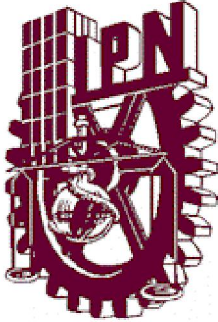


INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

HIDRAULICA DE RIOS

SOCAVACIÓN EN RÍOS, PUENTES Y CARRETERAS.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A:

MARIA ELENA SANTIAGO CASANOVA

A S E S O R:

ING. ENRIQUE ALBARRAN AGUILAR



MEXICO, D.F. 2007

Dedicado a mis padres Esther Casanova Mendoza y
Javier Santiago Guzmán, por el cariño y apoyo que siempre me han brindado



A mis hermanos
Javier
Gerardo
Gabriel
Araceli
Jorge y
Noe
Por su apoyo

A todos mis familiares y

En especial con todo mi amor y admiración a mi esposo Carlos y a mis adorados



A mi amigo Víctor Manuel fausto Rodríguez Sánchez Por alentarme a

Al Ingeniero Enrique Albarran Aguilar profesor, cuya dirección hizo posible la

A los profesores, cuya enseñanza son invaluables a mi institución por la formación profesional que me otorgó, a la cuál dedico con orgullo.

Muy en especial a los Ingenieros de la ESIA
Mario Castro Usla.
Rafael López Ramos,
Víctor Manuel Ruiz Desachy
Sergio Garduño Mendieta, por los consejos y ayuda



A todos los Ingenieros de la ICA, por alentarme y apoyarme para

Maria Elena Santiago

INDICE GENERAL

		PÁGINA
	INTRODUCCIÓN	1
	Objetivos	6
	Fenómenos naturales que intervienen en la socavación	7
	Descripción de socavación	30
	Generalidades	31
I	TIPOS DE SOCAVACIÓN	33
I.1	Socavación general del cauce	50
I.2	Socavación general en cauces definidos	51
I.3	Análisis de la socavación general para suelos cohesivos en cauces definidos con rugosidad uniforme	52
I.4	Análisis de la socavación general para suelos no cohesivos, en cauces definidos con rugosidad uniforme	57
I.5	Cálculo de la profundidad de la socavación en suelos homogéneos	57
I.6	Cálculo de la profundidad de la socavación en suelos no homogéneos	58
I.7	Socavación general en cauces indefinidos	59
II	TEORÍA DE LISCHTVAN-LEBEDIEV	60
II.1	Criterios para la socavación local en las pilas de los puentes	62
II.2	Método de Laursen y Toch	63
II.3	Método de Yaroslavtziev	69
II.4	Método para suelos granulares sin cohesión	69
II.5	Método para suelos cohesivos	71
II.6	Comparación entre los métodos de Laursen-Toch y Yaroslavtziev	73
II.7	Métodos de la División de Investigación (UNAM)	74

III.	SOCAVACIÓN AL PIE DE ESTRIBOS	82
III.1	Protección contra la socavación local al pie de pilas	84
III.2	Obras de control	86
III.3	Control de inundaciones	88
III.4	Mitigación de los efectos de las inundaciones	89
IV.	COMO EVITAR INUNDACIONES	90
IV.1	Fotografías en temporada de lluvias y estiaje Río Santiago-Lerma (P.H. El Cajón) Tepic.	91
V.	FOTOGRAFÍAS DE SOCAVACIÓN EN RÍOS, PUENTES Y CARRETERAS EN CHIAPAS	96
V.1	Fotografías aéreas de la devastación en Chiapas.	100
VI.	CONCLUSIONES.	101
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍCAS	103

INDICE PARTICULAR

		PAGINA
	INTRODUCCIÓN	1
I.	TIPOS DE SOCAVACIÓN	33
II.	TEORÍA DE LISCHTVAN-LEBEDIEV	60
III.	SOCAVACIÓN AL PIE DE ESTRIBOS	82
IV.	COMO EVITAR LAS INUNDACIONES	90
V.	FOTOGRAFIAS DE SOCAVACIÓN	96
VI.	CONCLUSIONES	101
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	103

HIDRÁULICA DE RÍOS

SOCAVACIÓN EN RÍOS, PUENTES Y CARRETERAS.

INTRODUCCIÓN.

El recrudecimiento de los extremos del tiempo meteorológico en los años 90, es verdaderamente impresionante. Imágenes de tragedias humanas, como el Huracán Mitch, nos conmueven. Pero detrás del tiempo meteorológico que bate todo el récord, hay tendencias a largo plazo provenientes de datos científicos que apuntan a un calentamiento global real, y a que son contaminantes que atrapan el calor causados por actividades humanas su principal causa.

En los primeros 11 meses de 1998, el mundo perdió casi 90 mil millones de dólares en daños relacionados con el clima, la mitad más que el récord previo establecido sólo dos años antes, y más daño económico en un solo año que en todos los años de la década de los 80 juntos. El año más destructivo en la historia del tiempo meteorológico, fue también el año más cálido desde que se comenzaron a medir temperaturas con termómetros en 1860, y probablemente el más cálido en 1200 años.

Olas de calor extraordinarias, inmensos incendios forestales motivados por la sequía, tormentas rugientes, precipitaciones torrenciales e inundaciones catastróficas. Una creciente ola de eventos climáticos extremos está asolando el planeta.

Las actividades del hombre alteran y afectan a los ecosistemas de la Tierra, por lo que resulta importante comprender tanto los patrones de la evolución como la estructura y función de los ecosistemas y el almacenamiento y flujo de la energía y la materia. También es importante conocer las cadenas alimenticias de la degradación, que se inician en el suelo con la materia orgánica muerta de plantas y animales que continúa (en el agua) por bacterias, hongos y otros pequeños animales degradadores que liberan bióxido de carbono, agua y energía, que pueden ser incorporados a otras cadenas alimenticias más complejas de animales mayores. En ciertas condiciones los organismos consumen el oxígeno disponible y la descomposición de la materia es incompleta por lo que se forman productos como el metano, alcoholes, amina, ácido sulfhídrico y materia orgánica descompuesta que puede provocar grandes y graves consecuencias en los sistemas vivos.

Como la atmósfera de la Tierra absorbe más energía que la que emite, se calienta, pero como al aumentar la temperatura de un cuerpo emite más radiación, se establece un equilibrio térmico. La atmósfera y la superficie terrestre se calientan y emiten energía infrarroja (con una

longitud de onda máxima de 16 000 nanómetros). La temperatura promedio global de la Tierra es de 15 ºC.

El aire y el agua del mar son unos fluidos retenidos por la fuerza de gravedad en la superficie de un cuerpo giratorio que es el planeta Tierra. Para ponerlos en movimiento en relación a la superficie sólida de la Tierra se necesita energía y la fuente primaria de energía es el Sol, que irradia energía en todas direcciones y su flujo es principalmente en las regiones del espectro electromagnético de la luz visible y próxima a ésta y en la ultravioleta y la infrarroja. La Tierra recibe un poco de la energía solar, el equivalente a 175 000 millones de megavatios.

La luz solar no se utilizan directamente, las plantas la usan para la fotosíntesis, la atmósfera transforma la energía térmica en viento y el mar en olas, etc. La Tierra recibe del Sol un flujo de energía de 340 vatios/m^2 como promedio global, día y noche y comprendidas todas las latitudes. Produce una potencia mecánica media de 2.4 vatios/m^2 para mantener la circulación atmosférica, es decir, un rendimiento del 0.7 %. Esta tasa de conversión resulta apenas superior a la de la producción directa de energía química a partir de la radiación solar, mediante el proceso de la fotosíntesis de las plantas terrestres en su fase de crecimiento.

Es necesario que la gente tome conciencia de la magnitud del problema que implica el cambio climático y de su probable relación con la generación de más huracanes como los que acabamos de presenciar.

Además de altas temperaturas, para que se forme un huracán se necesita que no haya mucho contraste entre los vientos que corren cerca de la superficie del mar los que corren unos 15 kilómetros mas arriba.

El cambio climático pronostica que la temperatura de la superficie va a aumentar y de acuerdo con las leyes de la termodinámica, a mayor temperatura en el mar, aumenta la probabilidad de que se tengan mas huracanes intensos.

Los huracanes son un conjunto de nubes que se forman en los mares más cálidos, a los que los científicos les llaman “albercas de agua caliente”. Cuando en el mar hay mas de 27 grados centígrados se forman nubes muy profundas, lo cual es la premisa básica para que se forme un huracán. Otras condiciones pueden llevar a que estas nubes se organicen y circulen de tal forma que se cree una depresión tropical (vientos de hasta 63 Kilómetros por hora), y luego, de seguirse intensificando, un huracán.

¿Qué es un huracán?

"Es un sistema de nubes en rotación acompañado de viento y fuertes tormentas. Para que se origine requiere tomar el calor emanado por el vapor de agua que se condensa a grandes altitudes en medio del mar", explica Manuel Pené Garduño López, Investigador del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Pero, una vez que se ha formado, ¿de dónde toma su fuerza? Kerry Emanuel, del Departamento de Ciencias Planetarias Atmosféricas y Terrestres del Instituto Tecnológico de Massachusetts, en Estados Unidos dice que el aumento de la intensidad de los huracanes depende de la temperatura de la superficie de los océanos; para que se formen ésta debe ascender a 26.5 o 27 °C, índice que produce una gran humedad a consecuencia de la evaporación del agua del mar y un viento que hace ascender el aire en forma de espiral, lo que se conoce como ojo de huracán. Es muy importante, además, que a esas nubes tormentosas no las rompa el viento en niveles altos, porque se alteraría su dinámica. En la formación de los huracanes-también conocidos como tifones o ciclones tropicales-, aunque aún su mecanismo no se entiende a la perfección, se conjugan seis factores:

1. Temperatura del agua de al menos 26.5 °C hasta una profundidad mínima de 50 m. Las aguas en estas condiciones provocan que la atmósfera sea lo suficientemente inestable como para sostener una convección.

2. Enfriamiento rápido con la altura. Esto permite la expulsión de calor latente, que es la fuente de energía en un ciclón tropical.

3. Elevada humedad, especialmente en las alturas baja a media de la troposfera. Cuando hay mucha humedad en la atmósfera, las condiciones son más favorables para que se formen huracanes.

4. Baja evaporación vertical. Cuando ésta es alta, la convección del ciclón se rompe y evita la formación del huracán.

5. La distancia al ecuador. Permite que la fuerza de Coriolis desvíe los vientos hacia el centro de bajas presiones, y promueve una circulación. La distancia aproximada es 500 km o 10 grados.

6. Un sistema de perturbación atmosférica preexistente. El sistema debe tener algún tipo de circulación como centro de bajas presiones. De acuerdo con el científico de la UNAM Garduño López, cuando un huracán pasa por el océano su superficie se enfría de forma sustancial, y este efecto eleva el riesgo de un nuevo sistema de nubes. "Este proceso actúa como un 'motor de calor', ya que transfiere el calor de la superficie del océano a la atmósfera a través de la evaporación, de esta forma hay un ascenso de agua fría debido al efecto de succión del centro de bajas presiones de la tormenta. El enfriamiento puede durar sólo unos días y permitir una nueva evaporación más rápida; si la intensidad del sol es suficiente para calentar de nuevo el agua", advierte. Los meteorólogos de National Oceanic and Atmospheric Administration de Estados Unidos han determinado las zonas Donde los huracanes se forman con mayor frecuencia:

Océano Atlántico Norte La región más estudiada todas incluye el océano Atlántico, el Mar Caribe y el Golfo de México. La formación de ciclones tropicales aquí varía ampliamente de un año a otro, alrededor de veinte por año. La costa atlántica de Estados Unidos, México, América Central, las Islas Caribeñas y Bermudas se ven con frecuencia afectadas.

Océano Pacifico Noreste Es la segunda región más activa del mundo, y la más densa (mayor número de tormentas en una menor región del océano). Las tormentas que se forman aquí pueden afectar el oeste de México, Hawai, norte de América Central y, en ocasiones extremadamente raras, California.

Océano Pacífico Noroeste La actividad tropical en esta región afecta de manera frecuente a China, Japón, Filipinas y Taiwán, pero también a otros países en el sureste asiático, como Vietnam, Corea del Sur e Indonesia, además de numerosas islas de Oceanía. La costa de China recibe la mayor cantidad: de entradas en tierra de ciclones en el mundo.

Océano Índico Norte La temporada de huracanes; en esta región comprende dos épocas, una en. Abril y mayo antes del comienzo del monzón, y otra en octubre y noviembre justo después de éste. Los huracanes que se forman en esta zona han sido históricamente los que más muertes han cobrado -el más terrible, el ciclón *Bhola* de 1970, acabó con la vida de 200,000 personas-. Los países afectados por esta región incluyen a India, Bangladesh, Sri Lanka, Tailandia, Myanmar y Pakistán.

Océano Pacifico Sureste La actividad tropical en esta región afectada sobre todo a Australia y Oceanía

Océano Indico Sureste En esta región. la actividad tropical incide en a Australia e Indonesia.

Océano Indico Suroeste Es la menos entendida de todas las regiones, debido a la ausencia de datos históricos. Los ciclones que se forman aquí afectan a Madagascar, Mozambique, Isla Mauricio y Kenia.

Los huracanes están clasificados en cinco tiempos diferentes, de acuerdo con la intensidad de sus vientos y los desastres que provocan. Cuando estos rebasan los 250 kilómetros, se clasifica en la escala 5, vientos de esta magnitud rompen cualquier cosa que se le ponga enfrente así como las olas pueden alcanzar hasta 10 metros, lo cual es notable cuando uno esta acostumbrado a tener olas de 30 o 40 centímetros. Zafiro-Simpson, nos dice que la gran peligrosidad de los huracanes radican en la fuerza con que sus vientos golpean y la energía que guardan en su interior, la cual según científicos del National Center Of Atmospheric Research o NCAR (Centro Nacional de Investigación Atmosférica) alcanza entre 50,000 y 200,000 millones de vatios, comparable a una bomba nuclear de 10 megatones.

Tabla 1

Intensidad Escala Saffir-Simpson				
categoría	velocidad del viento	oleaje	nivel de daños	ejemplo
1	119-153 km/h	1.2-1.5 m	Sin afectaciones en las estructuras de los edificios. Si a casas flotantes no amarradas, arbustos y árboles. Inundaciones en Zonas costeras y daños de poco alcance en puertos.	Agnes, Danny y Ofelia
2	154-177 km/h	1.8-2.4 m	Caída de tejados, puertas y ventanas. Importantes daños en la vegetación y casas móviles. Inundaciones en puertos así como ruptura de pequeños amarres.	Bob, Bonnie, Frances y Juan
3	178-209 km/h	2.7-3.7 m	Daños estructurales en edificios pequeños. Destrucción de casas móviles. Las inundaciones arrasan edificaciones pequeñas en zonas costeras y objetos a la deriva pueden causar daños en edificios mayores. Posibilidad de inundaciones tierra adentro.	Fran, Isodoro y Jeanne
4	210-249 km/h	4.0-5.5 m	Daños generalizados en estructuras protectoras, desplome de tejados en edificios pequeños. Alta erosión de bancales y playas. Inundaciones en terrenos interiores.	Charley, Hugo, Iris, Katrina.
5	más de 250 km/h	5.5 m	Destrucción completa de tejados en algunos edificios. Las inundaciones pueden alcanzar a las plantas bajas de los edificios cercanos a las costas. Llega a ser requerida la evacuación masiva de áreas residenciales.	Andrés, Wilma y Gilberto.

Sin embargo, clasificación es un poco arbitraria, ya que en algunas ocasiones un huracán de clase 1 puede causar más daños que uno de clase 5, dependiendo de la zona por donde entre a tierra y de otras características de la costa. En una tormenta pequeña el ancho del área de vientos nos es muy grande (más o menos 30 Kilómetros), pero en los grandes huracanes del Atlántico, el ancho de la zona de vientos destructores puede ser de hasta 500 kilómetros.

El viento, aire en movimiento y su velocidad depende del gradiente de presión, así como la presión intermitente que ejerce sobre las estructuras y edificios, es uno de los efectos más desastrosos de los huracanes.

Como consecuencia los sistemas de drenaje y los ríos no pueden evacuar toda el agua que el sistema esta recibiendo por las intensas lluvias que un huracán deja durante días, provocando que haya desbordamientos y causen inundaciones.

En los últimos 100 años nos hemos calentado 0.6 grados, parte del aumento es resultado de la actividad humana, al haber una atmósfera mas caliente, cabe mas vapor, y puede aumentar él numero de tormentas intensas. Es decir, habrá mas aguaceros (de 20 milímetros por hora que es mucho agua) y probablemente mas huracanes de mayor intensidad.

En una cumbre internacional sobre cambios climáticos realizada en Montreal (la primera desde la de Kyoto de 1997), los representantes estadounidenses siguieron negando los peligros e inclusive la existencia del calentamiento global, a pesar de que un científico ingles dijo que están peligrosos para el futuro de la humanidad como las armas de destrucción masiva. Los observadores de la cumbre, a la que asistieron 190 países, no tenían esperanzas de que llegara a los cuerdos internacionales para controlar las emisiones de los gases de invernadero: el principal causante del rápido aumento de las temperaturas globales. Aunque las metas de reducción de emisiones pactadas en Kyoto son criminalmente inadecuadas (reducir en el años 2012 las emisiones al 5% por debajo del nivel de 1990), en realidad han aumentado; ni la Unión Europea, que apoyo el acuerdo de Kyoto, ha reducido las emisiones como prometió.

“Por lo general, los huracanes se desactivan cuando tocan tierra, pues ya que no obtienen un medio para conservar su fuerza e inercia. El fenómeno se produce cuando el ojo alcanza el continente y se queda sin agua cálida que necesita para retroalimentarse, y rápidamente pierde fuerza”, indica Garduño López.

Sin embargo, existen otros factores que le restan fuerza, como permanecer durante mucho tiempo en la misma zona del océano, lo que agota la fuente de calor de la superficie hasta que ésta demasiado fría para seguir alimentando a la tormenta.

Objetivos.

En los últimos años se han presentado grandes desastres en nuestro país debido a problemas de erosión y flujo de lodos así como de material grueso arrastrado por avenidas extraordinarias. En muchos casos el problema se le atribuye a la mala planeación, diseño, operación, mantenimiento o construcción de obras, así como asentamientos cercanos y dentro del área de influencia del cauce de los ríos.

Los problemas que se presentan en los diseños de estructuras hidráulicas cuando se necesita evaluar de manera confiable los volúmenes de sedimentos que los ríos transportan hasta las obras y que a menudo ocasionan fallas en la operación de bocatomas y presas de embalse, en el torno de las inundaciones y en las protecciones de las márgenes, se deben a los siguientes factores.

* Deficiencia en la información cartográfica e hidrometeorológica de las cuencas vertientes y de caudales líquidos y sólidos en la mayoría de los ríos.

* Desarrollo aún incipiente de los métodos de medición de sedimentos y de aplicación de fórmulas empíricas a casos reales.

* Cambios en las prácticas tradicionales de manejo de la cuenca después de construir las obras.

En los primeros dos casos las cargas totales de trasporte de sedimentos que se aplican en el diseño de las obras pueden resultar excesivas o deficientes; en el tercero, el pronóstico hecho con base en la información histórica resulta irreal.

Por las razones expuestas, para lograr un buen diseño de las obras que van a estar sometidas al efecto de los sedimentos es necesario evaluar, además de la información histórica existente entre la cuenca como productora de sedimentos y el río como conductor de los mismos.

Es indispensable que en la solución de estos problemas se considere la experiencia y el buen juicio de los ingenieros especialistas en hidráulica, así como el análisis extenso de los casos de falla que se han presentado.

En función de la necesidad de tener la confirmación técnico-científica del fenómeno de la socavación y que podría ocurrir en los depósitos de aluvión existentes sobre el contorno estructural rocoso, bajo la influencia del caudal del río y respectivas velocidades e incidentes.

La socavación se clasifica como general y local. La general es la que se produce en lechos aluviales o cohesivos por efecto de la dinámica de la corriente y está relacionada con la conformación del nivel de base. Es un fenómeno a largo plazo, aun cuando eventos catastróficos pueden acelerarlo. Por otra parte los locales se presentan en sitios particulares de la corriente y es ocasionada por el paso de crecientes y por la acción de obras civiles, como obras de encauzamiento, espolones, puentes con pilas o estribos dentro del cauce, obras transversales de control etc. Antes de diseñar obras para tratamiento de causes es necesario conocer la magnitud de la socavación general se deben realizar análisis geomorfológicos entre puntos de control, o sea entre secciones estables. Estos análisis se basan en el estudio de fotografías aéreas y cartografía de diferentes épocas y los cambios que se aprecien en observaciones de campo y en levantamientos topográficos.

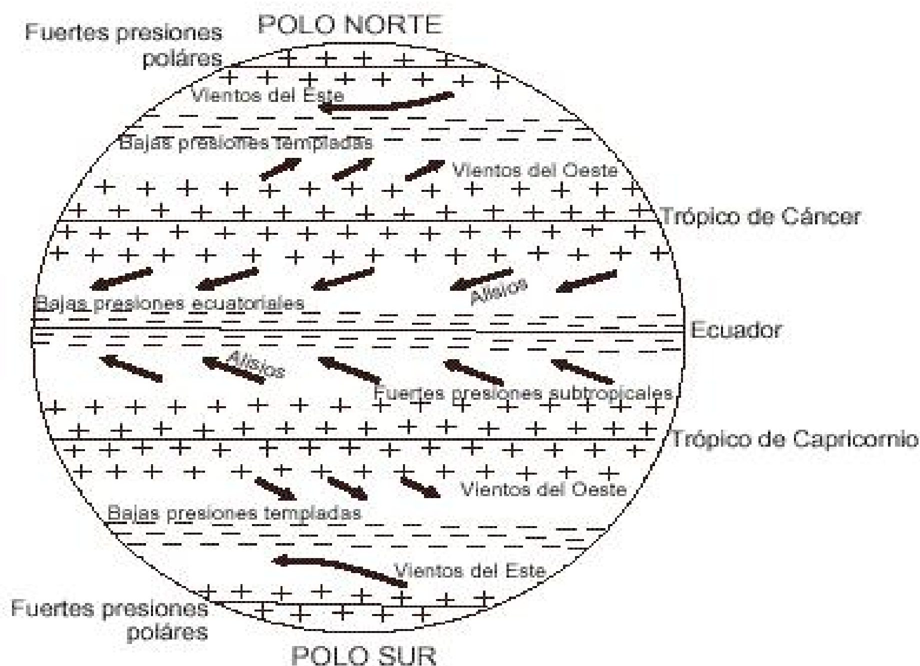
Fenómenos naturales que intervienen en la socavación.

a) Vientos.

Dice el diccionario que la palabra viento viene del latín *ventus* y significa "aire atmosférico que se mueve una dirección determinada". Dice también que es "aire agitado de cualquier modo", es decir que cualquiera puede provocar viento simplemente agitando el aire.

Es el movimiento del aire en la atmósfera con relación a la superficie terrestre, originado por la diferente densidad de masas de aire que se encuentran a distinta temperatura. En meteorología se denomina como tal la componente del movimiento del aire paralela a la superficie terrestre.

Los movimientos de las masas de aire en otras direcciones se denominan corrientes de aire. Por medio del viento se transporta la humedad y el calor de unas zonas a otras, parámetros fundamentales que configuran el tiempo en un lugar. Al ser una magnitud vectorial se define por su dirección sentido y por su velocidad. Por la atmósfera terrestre circulan corrientes de aire en forma constante, que se mantienen en equilibrio porque cuando viene una corriente de aire en dirección norte, se ve contrarrestada por otra que va en dirección sur.



Durante miles de años el hombre dependió de los vientos: ellos traían la lluvia a la tierra e impulsaban los barcos por los mares. Estudiaba la circulación de los vientos para poder utilizarlos en su provecho. Por ejemplo, los barcos árabes navegaban de África oriental a la India aprovechando los vientos monzones del sureste y regresaban con los monzones del noreste, sin necesidad de brújula. (figura 1)

Si la Tierra no rotase, los vientos soplarían principalmente en sentido norte-sur, pero al rotar, hace que desvían su rumbo. Los continentes crean sistemas de vientos locales. A ras de tierra, el

aire se desplaza desde ambos hemisferios hacia el Ecuador. El intercambio de aire entre los hemisferios norte y sur es un proceso bastante lento. Durante más de 3000 años la mayoría de los barcos fueron movidos por el viento. El molino de viento fue probablemente inventado en Persia y fue adoptado en la Edad Media para moler grano y extraer agua. Hoy el hombre aprovecha el viento para generar electricidad en estaciones eólicas experimentales.

El viento, tan presente como benéfico a veces o catastrófico en ocasiones, adquirió pronto diversas personificaciones; así, Boreas fue la denominación para los vientos huracanados del Norte y Céfiro fue la cara amable de las suaves brisas del Sur. Poseidón, librando encarnizadas batallas con sus huestes de Tritones y Nereidas dio explicación a las tormentas y tempestades, de la misma manera que justificó los cálidos vientos y las suaves brisas. En un punto determinado del Mediterráneo debieron nacer, en hora incierta, las denominaciones de los puntos cardinales y también los nombres de los vientos intermedios.

Los lugares por donde nace y muere el sol señalan, desde siempre, los puntos cardinales del Este y el Oeste. La posición del sol en su punto más alto del mediodía señala igualmente el eje Norte-Sur. Los vientos al soplar no coincidían siempre con los ejes geográficos principales, por lo que fue necesario identificar direcciones intermedias. Los nombres de Greco o Gregal, Siroco o Xaloc, Lebeche y Maestro o Mistral tomaron carta de naturaleza.

Pero para que determinado viento sea identificado con una dirección dada es preciso partir de una localización precisa. A pesar de no ser un viento intermedio, la Tramontana, equivalente del viento del Norte, toma su denominación de "más allá de los montes" y se aplica, haya o no una cadena montañosa, al norte. En Cataluña, la Tramontana adquiere un significación especial, sobre todo en la costa gerundense y también en Baleares, concretamente en la isla de Menorca. Según se dice, es responsable principal tanto del "seny" como de la "rauxa", características temperamentales asimilables al sentido común y a la fantasía.

Así, para el Greco, por ejemplo, el lugar de observación debía estar necesariamente al sur y al oeste de Atenas. Para el Siroco, viento que viene de Siria, la cuna de los vientos debía estar al norte y al oeste de Damasco.

Para el Lebeche, viento que viene de Libia, el lugar de observación debe situarse al norte y al este de Trípoli. Notemos que incluso en mapas actuales se conoce esta capital por Tarabulus al Garb. Y por último, para el Maestro o Mistral, el origen debe de situarse al sur y al oeste de Roma. De ahí le viene el nombre de magíster, maestro o viento principal.

Estas cuatro ciudades, metrópolis del mundo conocido, dieron origen a algún lugar de la cuenca mediterránea oriental al nacimiento de los nombres de los vientos que aún perduran en la actualidad. Situando en la carta estos condicionantes geográficos, podemos indicar que el cruce del paralelo 36º N con el meridiano 20º E señala el lugar de la cuna de los vientos. En la cuenca del mar Jónico, en algún lugar de la ruta que une las islas de Malta y Creta, podemos situar con un grado de certeza aceptable el lugar del nacimiento de los vientos.

Dentro de la cultura grecorromana, los griegos fueron los poetas y los romanos los pragmáticos. El gran poeta Homero, con su obra La Odisea, donde refiere la azarosa vida de Ulises, dio una explicación poética al origen de los vientos mediante una ingeniosa leyenda. Habiendo arribado Ulises y sus marineros a la isla Eólica, su dueño y señor, Eolo agasajó a todos y, tras varios días de celebraciones y festejos, decidió regalar a Ulises un valioso presente que pudiese facilitar su regreso hacia Penélope. Se trataba del Odre de los Vientos, y bien le advirtió que nunca lo abriese, pues se podían desencadenar violentas tempestades al dar salida a todos los vientos a la vez.

Sólo en casos muy precisos y de manera muy cuidadosa podría luchar contra las calmas, pero siempre con mucho riesgo. Ulises y sus hombres se embarcaron de nuevo y pudo más la curiosidad que los consejos. En medio de la noche, la marinería, desoyendo las recomendaciones de Ulises, entreabrió la boca del Odre y, de repente, se desató tan feroz tormenta que puso en riesgo de zozobra a todos en su viaje de regreso a Itaca.

Hoy en día, los vientos han perdido parte de su misterio al ser clasificados simplemente de térmicos o de gradiente, y un señor francés, un tal Beaufort, llegó a encasillarlos en una escala que mide su fuerza. Pero aún perduran las denominaciones clásicas y Greco y Siroco siguen vivos en el lenguaje marinero. A pesar de las bajas y las altas presiones, a pesar del fetch y tantos otros términos técnicos, los vientos siguen teniendo un gran tanto por ciento de poesía, algo del hálito de los dioses. Hoy en día las denominaciones tales como Meltemi, Simoun, Cierzo, Tramontana y tantas otras siguen vigentes y obedecen a topografías locales que se engarzan en los vientos generales, y otras veces sustituyen o los suplantan.

Una denominación particular de un viento dominante de la costa catalana que nos recuerda nuestro pasado árabe merece nuestra atención; se trata del Garbí, soplando del 235º. Dicho suroeste conserva todavía la denominación de "oeste" en lengua árabe actual: Garb=Oeste. Viento que equivale al Embat de la Bahía de Palma de Mallorca. Otros lugares bautizan a sus vientos con nombres tan sugerentes como Virazón, Terral, Lemosino, etc., poniendo de manifiesto que todavía en los albores del tercer milenio los vientos son algo más que la escueta definición del diccionario: "aire en movimiento". (R.Cervera)

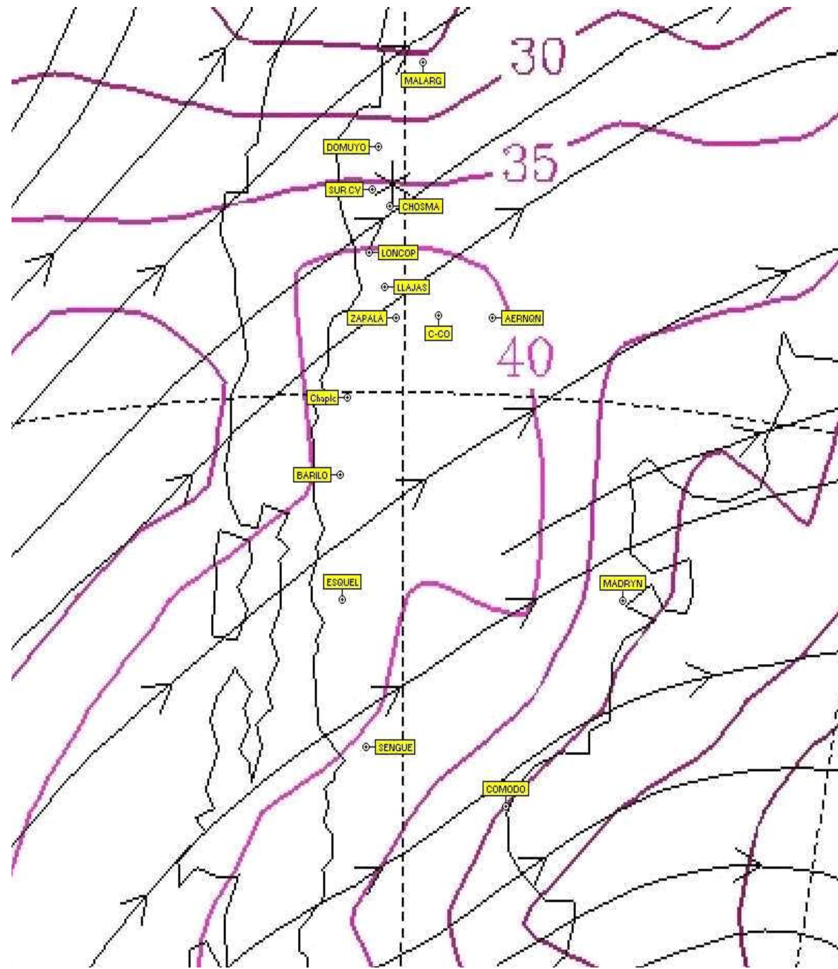
Los vientos alisios circulan en dirección predominante nor.-Este, como consecuencia del anticiclón atlántico, cargados de humedad. Casi constante en el verano y más irregulares en invierno, en que se ven afectados por otros factores meteorológicos. Influyen en la temperatura y humedad, por lo general entre 0 y 1500 metros. A mayor altura actúan vientos predominantes más secos, del Nor-Oeste.

Entre estos alisios hay una zona de inversión de temperaturas con diferencias del orden de 10 grados. Esta zona alta hace de techo, e impide que las nubes que forman los Alisios del NE se desarrollen verticalmente, con lo que contribuyen al conocido "mar de nubes" formado por estratocúmulos.

Generalmente abarca cotas entre 500 y 1500 metros. A veces llega a los 1800. En verano no suele bajar de los 1200. Estos Alisios afectan principalmente las zonas Norte, Nor-Este y Este. La influencia del continente Africano está limitada al viento seco que durante pocos días al año provoca altas temperaturas conocidas como "tiempo sur".

Tal vez sea más su participación indirecta, mediante las bajas presiones que se sitúan sobre el Sahara, y que durante períodos taponan un poco el paso a los alisios y las borrascas atlánticas que vienen hacia las islas Canarias. Las corrientes marinas Canarias llevan aguas que provienen de las zonas nórdicas, de manera que son más frías que las que les corresponden por latitud.

Su importancia viene dada en relación con los alisios que provienen también de zonas del Norte hacia el Sur y que influyéndose mutuamente se mantienen en temperaturas uniformes. De otra manera llegarían mas calientes y la temperatura sería más continental. Este hecho hace que éstas tengan poca variación a orillas del mar en los meses estivales.



Brisas, Durante el día la tierra se calienta con más rapidez que el mar y el aire situado sobre la tierra se eleva. Su lugar es ocupado por aire más frío del mar, creando una brisa de mar. De noche la tierra se enfría rápidamente mientras que el agua conserva el calor. El aire se eleva en el mar creando una brisa de tierra. A mayores alturas el sentido se invierte, ameno que otros sistemas de vientos mayores alteren el proceso. (figura 2)

En la capa atmosférica existen grandes masas de aire que se individualizan por su temperatura, su humedad y su presión. Casi no es exagerado decir que dos masas de aire diferentes se comportan, una respecto de la otra, como el aceite respecto al agua y no se mezclan. En cada hemisferio existen dos masas de aire fundamentales: el aire tropical y el aire polar, las cuales se dividen a su vez, en aire marítimo y aire continental.

Las distribuciones de viento y presión a gran escala que persisten durante todo el año o se repiten estacionalmente es a lo que denominamos *circulación general*, y una de las causas motrices principales de esta distribución es el desequilibrio de la radiación entre las latitudes bajas y las altas. De una manera esquemática diferenciamos los siguientes centros de acción que gobiernan la circulación general de la atmósfera:

- Una zona de bajas presiones ecuatoriales
- Dos zonas de altas presiones subtropicales hacia los 30 y 35 grados de latitud.
- Dos zonas de bajas presiones ecuatoriales.
- Dos zonas de bajas presiones templadas.

- Dos casquetes de altas presiones polares.

A los vientos del Este de la zona intertropical se oponen los vientos del Oeste de las regiones templadas. En las latitudes templadas, los vientos del Oeste soplan desde las altas presiones subtropicales hacia las bajas presiones templadas. En las latitudes altas, las fuertes presiones polares engendran vientos del Este. Entre los trópicos, los vientos alisios soplan desde las altas presiones subtropicales hacia las bajas presiones ecuatoriales.

Desviados por el movimiento de rotación de la Tierra, se convierten en vientos del sector Este, que soplan generalmente del Nordeste hacia el Suroeste en el hemisferio norte y del Sudeste hacia el Noroeste en el hemisferio sur. La teoría tradicional que explica el mecanismo de la circulación atmosférica es la de la *chimenea ecuatorial*, cuyo fundamento estriba en la acción de calor ecuatorial: el aire cálido en el Ecuador se eleva y origina una zona de bajas presiones que atraen los vientos alisios.

En altura, el aire ecuatorial se acumula para dirigirse luego hacia las latitudes subtropicales, creando así una corriente de altitud (el contra—alisio) que, al descender, origina las altas presiones subtropicales. Desde estas últimas, el viento se escapa, de una parte, hacia el Ecuador (alisio), y de otra, hacia las latitudes templadas (vientos del Oeste). Otra teoría concede gran importancia a la convergencia de los alisios de ambos hemisferios. Gracias a los aviones, satélites y globos sonda, se ha comprobado, por ejemplo, que los contra-alisios no tienen la amplitud ni la regularidad que se suponía.

La ascensión del aire en la zona ecuatorial obedece, según esta nueva teoría, a la convergencia en esta zona de los vientos alisios procedentes de los dos hemisferios (convergencia o frente intertropical): el alisio del hemisferio norte corre al encuentro del hemisferio sur (que hace lo mismo a su vez) y de ello resulta un movimiento ascendente.

La dirección se mide mediante la veleta según los 360 grados geográficos en intervalos de 10 grados. En la mar se emplean los 16 rumbos de la rosa de los vientos. Los anemómetros miden la velocidad, expresada comúnmente en metros/segundo y el nudo (milla náutica/hora). En la mar la velocidad se expresa en unidades de la escala de Beaufort.

En la actualidad se emplea el radar de viento para determinar la velocidad y dirección en una zona determinada. Para la medición del tiempo en altura se emplean las radiosondas y los globos pilotos.

En ambos se parte de una velocidad ascensional constante, determinándose desde la estación de seguimiento la posición del globo a intervalos fijos de tiempo; de esta forma se obtienen sus distintas posiciones en los últimos niveles de ascensión, con lo que se determina, según la magnitud y dirección de desplazamiento entre mediciones, la velocidad y dirección del viento a distintas alturas.

La diferencia entre el sondeo con radiosonda y el sondeo con globo piloto se realiza visualmente por medio de un teodolito, por lo que es imprescindible la ausencia de nubes para una observación completa, mientras que con la radiosonda el seguimiento se realiza automáticamente desde el suelo al estar dotado el globo de sondeo de un emisor de radio. En los sondeos con radiosonda, aparte del viento, también se determinan las temperaturas y humedades a distintas alturas.

En zonas en las que escasean las estaciones (grandes océanos, regiones polares), los aviones comerciales que las sobrevuelan los facilitan por medio de unos mensajes radiados

llamados AIREP, en los que figuran, para las distintas posiciones de la aeronave (latitud, longitud y altura), datos de velocidad y dirección y temperatura del viento.

b) Lluvia, nieve, granizo y tormentas.

Cuando la humedad del aire supera el punto de saturación, se condensa alrededor de pequeñas partículas sólidas que flotan en la atmósfera y se forman las nubes. Algunas de ellas se desarrollan en vertical, corrientes internas hacen que el aire ascienda hacia zonas más frías, mientras las gotas aumentan de tamaño ya que, al descender la temperatura, el agua en estado gaseoso tiende a convertirse en líquida.

Si las gotas de agua o hielo superan en peso a las fuerzas que las sostienen, caen por la fuerza de la gravedad y forman lo que llamamos una "precipitación".

Dependiendo de la temperatura y el grado de condensación, el agua se puede precipitar en forma de lluvia líquida, pero también puede hacerlo en forma de cristales de hielo (nieve) o de masas densas de hielo de diverso tamaño (granizo).

Cuando las diferencias de temperatura entre dos masas de aire son muy grandes, la condensación se produce con enorme rapidez y abundancia, hay precipitaciones intensas, acompañadas de movimientos bruscos del aire y de intercambio eléctrico entre las masas (rayos y relámpagos). Es lo que llamamos "tormentas" y, en algunos casos, pueden llegar muy violentas.

El viento es aire en movimiento. El aire caliente asciende y el aire frío ocupa su lugar. Este movimiento crea los vientos alrededor del globo terráqueo. El viento se genera a causa de diferentes presiones en la atmósfera.

Puesto que la Tierra gira, los vientos tratan de desplazarse hacia la derecha del hemisferio Norte y, hacia la izquierda, en el hemisferio Sur. A esto se le llama el Efecto Coriolis.

Efecto Coriolis.- A pesar de que los huracanes son sistemas que generan una cantidad enorme de energía, se trasladan con lentitud –un proceso comparable al de las hojas arrastradas por el tiempo-. Uno de los principales responsables de este movimiento es el efecto conocido como Coriolis, la rotación de la tierra proporciona cierta aceleración, la cual genera que los sistemas ciclónicos giren hacia los polos en ausencia de una corriente fuerte de giro (por ejemplo, en el norte, la parte al norte del ciclón tiene vientos al oeste, y la fuerza de Coriolis los empuja ligeramente en esa dirección. La parte sur es empujada al sur, pero dado que está más cerca del ecuador, la fuerza de Coriolis es más débil). Así los ciclones tropicales en el hemisferio norte, que habitualmente se mueven al oeste en sus inicios, giran al norte (y normalmente después son empujados al este), y los ciclones del Hemisferio Sur son desviados en esa dirección, si no hay un sistema de fuertes presiones, contrarrestando la aceleración de Coriolis. Esta aceleración también inicia rotación cíclica, pero no es la fuerza conductora que hace aumentar su velocidad. Esta velocidad se deben a la conservación del momento angular: el aire se capta en una área mucho más grande que el ciclón, por lo que la pequeña velocidad de rotación (originalmente proporcionada por la aceleración de Coriolis) aumenta con rapidez a medida que el aire entra en el centro de bajas presiones.



Efecto Coriolis.

Los vientos prevalecientes son una serie de correas alrededor del globo terráqueo que producen vientos constantes cerca de la superficie. Las corrientes fuertes son zonas estrechas de vientos muy fuertes en la parte superior de la troposfera.

Los vientos se mueven a diferentes velocidades y se les dan diferentes nombres basado en la Escala de Beaufort. Esta escala va del 0 al 12 y cubre desde aire calmado a brisas fuertes, vientos, o vendavales.

A los vientos también se les agrupa según su dirección. Los vientos del **Este** se desplazan del Este hacia el Oeste, mientras que los vientos del **Oeste** se desplazan del Oeste al Este.

El viento de mayor velocidad que se ha registrado fue de 230 millas por hora en New Hampshire en 1934. Cabe señalar que los tornados pueden tener vientos más rápidos. El lugar donde hay más vientos es en la Antártica.

La revista internacional científica *Nature* escribió hace poco que los posibles vínculos entre la formación de los huracanes y el calentamiento global son un tema polémico en el campo de la climatología. La división entre los partidarios y los escépticos se vio, cuando el meteorólogo estadounidense Chris Landsea renunció del Grupo Intergubernamental sobre Cambios Climáticos (IPCC), una organización que trabaja con el Programa Ambiental de la ONU. Landsea renunció como protesta contra las declaraciones de un colega, Kevin Trenberth, quien dijo en una rueda de prensa que esos vínculos existen.

Clasificación de la Velocidad de los Vientos

Número de Beaufort	Velocidad del Viento (Km./hr)	Descripción Internacional	Descripción del Buró de Clima de EEUU	Efecto del Viento sobre el Mar
0	<1	Calmo	Vientos suaves	Oleaje suave
1	1-5	Brisa suave	Vientos suaves	Oleaje suave
2	6-11	Brisa suave	Brisa suave	Oleaje suave
3	12-19	Brisa moderada	Suave-Moderada	Olas grandes y pequeñas
4	20-28	Brisa moderada	Suave-Moderada	Olas grandes y pequeñas
5	29-38	Brisa fresca	Viento fresco	Oleaje moderado, muchas crestas
6	39-49	Ventarrones	Vientos fuertes	Grandes olas, muchas crestas
7	50-61	Brisa fresca	Vientos fuertes	Grandes olas, muchas crestas
8	62-74	Ventarrón	Vientos fuertes	Olas altas, mucha espuma
9	75-88	Ventarrón	Vientos fuertes	Olas altas, mucha espuma
10	89-102	Ventarrón constante	Ventarrón constante	Olas muy altas, mar revuelto
11	103-117	Tormenta	Ventarrón constante	Olas muy altas, mar revuelto
12-17	>117	Huracán	Huracán	Mar blanco, lleno de crestas, rocío y espuma

Tabla 2

El artículo de *Nature* dice: "El punto de vista de Trenberth cuenta con el apoyo del análisis más reciente y sólido de la destructividad de los huracanes en los últimos 30 años, realizado por el investigador Kerry Emanuel del Massachusetts Institute of Technology de Cambridge, Massachusetts". Emanuel concluyó que "el calentamiento futuro podría llevar a una tendencia ascendente del potencial de destrucción de los ciclones tropicales, y a un aumento sustancial de las pérdidas relacionadas con ellos en el siglo 21".

El ciclón desde dentro. La mayor parte de la gente que vive en las costas de los países cercanos al ecuador sabe lo que es un huracán, y los daños que provocan cuando se aproxima, pero ¿cuál es la mecánica interna de estos fenómenos meteorológicos? Manuel Garduño López, investigador del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), expresa que un ciclón tropical puede verse como una gigante máquina térmica vertical soportada por la mecánica y fuerzas físicas como la rotación y gravedad de la Tierra.

Aunque aún no hay una forma de saber con exactitud cuándo o dónde se formarán los huracanes, se han desarrollado algunos métodos de predicción. De acuerdo con Kerry Emanuel, del Departamento de Ciencias Planetarias Atmosféricas y Terrestres del Instituto Tecnológico de Massachusetts, en Estados Unidos, muchas veces el giro inicial de un ciclón tropical es débil y, como la mayoría de las veces está cubierto por nubes, es imposible detectarlo desde el principio con los satélites meteorológicos, por ello se ha recurrido a otros instrumentos como el Total Ozone Mapping Spectrometer, el cual puede identificar cantidades de ozono íntimamente relacionadas con la formación, intensificación y movimiento de un ciclón, incluso para determinar la ubicación del centro de éste. Manuel Garduño asegura que las concentraciones naturales de ozono son más elevadas en la estratosfera, por lo que el aire más cercano a la superficie oceánica es menos rico en este gas.

Cuando está por generarse un huracán, los niveles más altos decrecen, bajan y rodean la zona que dará forma al 'ojo'. Posteriormente se genera un anillo de potentes tormentas que absorben el aire húmedo y cálido de la superficie del océano y lo elevan a un kilómetro en la atmósfera. Este proceso hace que se forme una columna de ozono en la parte central del huracán. Los investigadores han determinado que entre más descendentes son los niveles de ozono en la parte alta, el fenómeno adquiere mayor fortaleza.

Para el especialista de la UNAM existen otros factores climatológicos que de manera determinante influyen en el origen de los ciclones. "Las ondas tropicales, ricas en vientos del este hacia el oeste, fomentan el fenómeno Coriolis -movimiento de rotación de la Tierra que estimula la del huracán- y la formación de tormentas eléctricas, que pueden transformarse en huracanes. Asimismo, si los canales troposféricos superiores, núcleos fríos de vientos en capas altas, descienden en medio del mar, producen convección profunda con el calor del agua evaporada y fomentan el huracán".El especialista añade que esta condensación eleva la velocidad de los vientos, ya que una pequeña fracción de la energía expulsada se convierte en mecánica que conduce las corrientes de aire, lo que aumenta la altura de las nubes y acelera la condensación. Esto se convierte en un circuito que provee al sistema la energía necesaria para ser autosuficiente y causar un bucle de alimentación positiva donde puede obtener más energía siempre que la fuente de calor –agua cálida- persista, pues la evaporación de esta humedad se acelera por los vientos fuertes y se reduce por la presión atmosférica en la tormenta, resultado de un vórtice. “Otro factor que permite la persistencia de los huracanes tras su formación es el propio movimiento de la tierra, que causa que el sistema gire”, apunta Manuel Garduño López.

En un informe de 2001, mucho antes del huracán Katrina, el IPCC decía: "Hay evidencia de que la frecuencia regional de los ciclones tropicales podría cambiar… Además, hay evidencia de que la máxima intensidad podría aumentar de 5% a 10% y de que la precipitación podría aumentar de 20% a 30%. Se necesita mucha más investigación en esta esfera para obtener resultados más sólidos". En agosto de 2005, la temperatura del golfo de México era de 2 a 3 grados centígrados más alta que lo normal en esa temporada. La energía del agua cálida es el motor que impulsa los huracanes; Katrina absorbió tanta energía del agua del Golfo que después la temperatura del mar bajó dramáticamente, en algunas regiones de 30 a 26 grados C.

Julián Heming, experto en huracanes del Met Office de Exeter, Inglaterra, dice que habrá que reunir datos de un período más largo para establecer un vínculo firme entre el calentamiento global y la mayor fuerza de los huracanes: "Este informe confirma el punto de vista generalizado de

la comunidad científica de que, aunque es posible que el calentamiento global no haya afectado la frecuencia de los ciclones tropicales ni la proporción de ellos que llegan a ser huracanes, podría tener un impacto en la pequeña proporción de ciclones tropicales que llegan a ser de categoría 4 ó 5". (Katrina fue uno de ellos).

c) Fenómeno climático.

Anomalía climática originada en el océano Pacífico tropical frente a las costas de Perú y Ecuador, con periodicidad de tres a cinco años alrededor de la Navidad. Normalmente los alisios soplan de Este a Oeste portando gran cantidad de agua superficial templada que descargará intensas lluvias monzónicas en Indonesia, mientras que por la cola occidental sudamericana aflora agua fría cargada de nutrientes y favorable a la pesca.

Aproximadamente cada cuatro años en el Pacífico oriental el agua superficial se calienta hasta unos 12ºC y permanece estacionaria: un fenómeno local de impacto mundial en cuanto al clima y cadenas de tróficas. Los alisios ceden el monzón descarga en pleno Pacífico, y, mientras puede llover torrencialmente en el desierto de Atacama o en la costa de California, hay sequía en el Pacífico Occidental. Cada episodio de El Niño puede generar teleconexiones y patrones climáticos similares a larga distancia. En el período 1973-1990 la curva del maíz en Zimbabwe fue réplica del remoto El Niño.

Las consecuencias económicas son importantes, entre otros aspectos por la caída de la pesca en la región. En 1982-1983 se produjo El Niño más acusado de este siglo, con pérdidas de hasta 8.000 millones de dólares en el mundo entero, mortandad de personas y animales, incendios forestales en el Este de Borneo, sequía en el Este de Australia, en Indonesia, India, Sri Lanka, China e incluso África y Brasil, mientras los tifones asolaban Hawai y Tahití.

En aguas peruanas, a captura de anchoa cayó en 1983 al 1 por ciento de la de 1973. Se ha detectado un preocupante acortamiento de la periodicidad del fenómeno, que ha llegado a producirse varios años seguidos, lo que podría relacionarse con un cambio climático global. Se estudian otras periodicidades del fenómeno y de su contrapartida fría, La Niña, si la temperatura, la humedad y la presión son los elementos que determinan el clima, el viento y las precipitaciones son sus más evidentes (y perceptibles) consecuencias. El viento es la circulación del aire de un lugar a otro, con más o menos fuerza, su principal efecto es el de mezclar distintas capas o bolsas de aire, cuando se concentra la humedad en una zona y esta asciende hasta una capa de aire más fría, se producen las precipitaciones. El viento se produce cuando una masa de aire se vuelve menos densa, al aumentar su temperatura, asciende y entonces, otra masa de aire más densa y fría se mueve para ocupar el espacio que la primera ha dejado.

Hay vientos generales y permanentes que recorren todo el globo terráqueo como consecuencia de la circulación general de la atmósfera, y otros vientos que se desencadenan a causa de los cambios meteorológicos locales. Algunos de estos últimos son periódicos, otros no; algunos afectan grandes regiones de la tierra, otros tienen un ámbito de actuación muy limitado.

Las condiciones topográficas de la Tierra hacen que haya vientos producidos por pequeñas alteraciones regionales. Por ejemplo, las brisas de tierra, aire fresco del mar hacia tierra durante el día, y las brisas de mar, aire fresco que viaja de la tierra al mar durante la noche.

Algo parecido ocurre en las zonas de montaña. Durante el día, la brisa de montaña del valle asciende hacia las cumbres, y la brisa de valle, que desciende desde las cumbres por la noche.

d) Calentamiento global.

Con la interacción de todas estas escalas de variaciones cíclicas y no cíclicas, naturales y por causa humana, no es de extrañar el intenso debate existente acerca de la magnitud y efectos del calentamiento global.

El impacto de estos cambios seria de consideración en las zonas costeras: incrementaría la erosión de sus líneas y el riesgo de inundaciones por fenómenos extremos, como huracanes y maremotos. Para ciertos ecosistemas marinos, las consecuencias no serian mejores, en especial para arrecifes coralinos, islas arrecifales y atolones. Otros ecosistemas costeros como humedales y manglares, también podrían ser afectados, aunque tal vez en menor grado.

Estos supuestos cambios afectarían al igual la salinidad de los océanos, el oleaje y los patrones de corrientes marinas, él rápido calentamiento de nuestro planeta es un hecho irrefutable, los verdaderos interrogantes son en qué medida ello es responsabilidad nuestra y si estamos dispuestos a frenar ese proceso al moderar nuestro apetito insaciable por los combustibles.

El calentamiento global puede parecer un concepto muy remoto o demasiado incierto. Las advertencias sobre el cambio climático pueden sonar a una táctica ambientalista para asustarnos y obligarnos a dejar los autos y fastidiar el estilo de vida que llevamos, la tierra tiene algunas noticias perturbadoras. Desde Alaska hasta las cumbres nevadas de Los Andes, el mundo se está calentando ahora mismo; y rápido. La temperatura en todo el mundo es 0.6°C más elevada que en el siglo pasado, los lugares más apartados y fríos se han calentado mucho más. Los resultados no han sido nada alentadores: el hielo se está derritiendo; los ríos se están secando, y las costas se están erosionando, lo cual amenaza a las comunidades. La flora y la fauna están sintiendo el calor, como se lee en las “Marcas geológicas” Estos cambios están ocurriendo muy lejos de nuestra vida, pero deberían tenerse presentes pues son presagios de lo que le espera al resto del planeta.

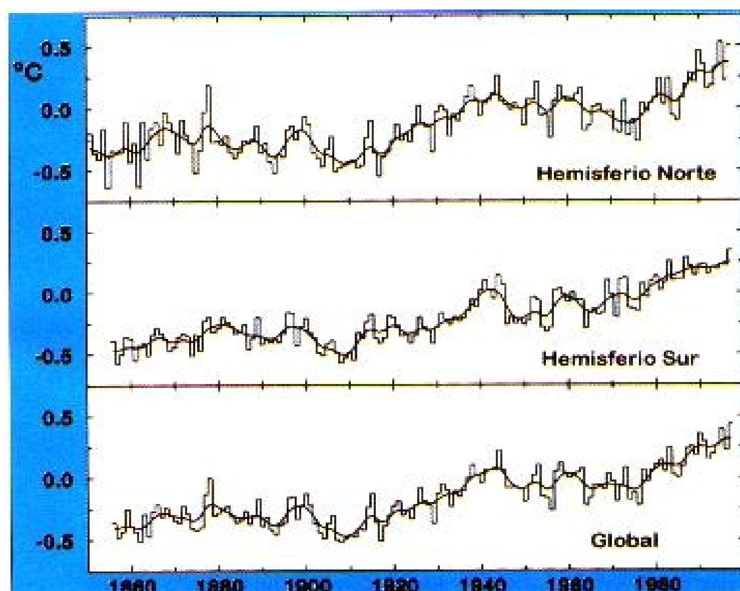
El clima es notablemente veleidoso: en Europa hace mil años era fragante, en Inglaterra crecían las vides; hace 400 años el clima se había enfriado y el río Támesis se congelaba con frecuencia. Los expertos en el clima dicen que es mejor no asegurarlo. Los ritmos naturales del clima podrían explicar algunas señales de calentamiento, pero parece ser que algo más está impulsando la fiebre que abarca al planeta.

Durante mucho tiempo hemos estado acabando con los bosques y quemando carbón, petróleo y gas, arrojando a la atmósfera dióxido de carbono y otros gases que atrapan el calor más rápido de lo que las plantas y los océanos pueden absorber. El nivel que actualmente tiene el dióxido de carbono es el más elevado en cientos de milenios.

Un informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), de la ONU, declaró con certeza que la actividad humana impulsó la mayor parte del calentamiento del siglo pasado. Las temperaturas globales se están disparando con mayor rapidez que en ningún otro momento de los últimos mil años. Los modelos del clima muestran que fuerzas climáticas naturales, como son las erupciones volcánicas y los lentos destellos solares, no pueden explicar todo ese calentamiento. De acuerdo a las proyecciones del IPCC, en la medida que el CO_2 siga en aumento, el termómetro también lo hará: entre 1.5 °C y 5.5 °C para el final del milenio. Pero el calentamiento podría no ser gradual. Los registros del clima antiguo que se describen en “Marcas del tiempo”

Las marcas que el calentamiento está dejando en nuestro planeta, son una muestra de los estragos que podrían ocurrir el próximo siglo. ¿Podemos actuar a tiempo para evitarlos? La Tierra lo dirá, según registros paleoclimáticos, la Tierra ha pasado alternadamente, por períodos de temperaturas altas y bajas (glaciaciones), y el clima ha variado sensiblemente a lo largo de la vida del planeta.

Marcas geográficas



El repliegue de los glaciares, el aumento en el nivel de los mares y el encogimiento de los lagos son algunas de las transformaciones en curso en la faz de la Tierra. (figura 3)

e) El gran deshielo.

El clima está cambiando a un paso desconcertante. Los glaciares van en retirada, las plataformas de hielo se fracturan, el nivel marino se eleva, el permafrost se derrite. A mediados del siglo XIX, el glaciar Unteraar se abría paso por el valle empinado de los Alpes centrales de Suiza con el aumento de las temperaturas, se ha regresado a una elevación mayor, retrocediendo más de dos mil metros. La historia es la misma en parte de Europa, Alaska, Sudamérica y otras regiones. Cuando se creó el Parque Nacional de los Glaciares en 1910, albergaba 150 glaciares. Desde entonces su número ha disminuido a menos de 30, y el área de la mayoría de los que aún quedan se ha encogido dos tercios. “Procesos que suelen ocurrir en tiempos geológicos están sucediendo en el curso de una vida humana”, afirma el científico Fagre.

Los científicos evalúan que la “salud” del planeta se ha estado calentando y, en algunos casos, rápidamente. La mayoría cree que la actividad humana, particularmente la quema de combustibles fósiles y la consecuente acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera, han influido en esta tendencia al calentamiento. En la última década, han documentado temperaturas superficiales anuales promedio que han roto marcas por lo elevadas y también han observado otros cambios en todo el planeta: en la distribución del hielo, la salinidad, y los niveles y temperaturas de los océanos.

En la tierra, el hielo está cambiando en todas partes. Las afamadas nieves del Kilimanjaro se han derretido en más de un 80 % desde 1912.

El hielo marino del Ártico se ha adelgazado significativamente, su extensión se ha reducido en alrededor de un 10 % en los últimos 30 años. El rompimiento primaveral del hielo en agua dulce en el hemisferio norte tiene lugar ahora nueve días antes de lo que ocurría hace 150 años y el congelamiento en el otoño sucede 10 días después.

El casquete de hielo de Quelccaya, Perú, es el más grande en los trópicos. Si se sigue contrayendo al ritmo actual casi 200 metros al año en algunas partes, para 2100 habrá desaparecido, dejando en la estacada a miles sin agua para beber y generar electricidad.

Cuando las temperaturas se elevan y el hielo se derrite, hace que fluya más agua a los océanos desde los glaciares y los casquetes de hielo, y el agua oceánica se entibia y su volumen se expande. Esta combinación de efectos ha provocado el papel principal en el aumento global del nivel del mar promedio en los últimos 100 años, el cual ha sido entre 10 y 20 centímetros de acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) de la ONU.

Los científicos mencionan que los niveles del mar han subido y bajado de una forma considerable en 4,600 millones de años en la historia de la Tierra.

El promedio global actual del aumento en el nivel del mar se ha apartado de la tasa promedio de los últimos dos mil a tres mil años y sube más rápidamente, entre 1 y 2.4 milímetros por año. La aceleración y continuación de esta tendencia provoca impresionantes cambios en los litorales del mundo.

Temperatura y registros de CO_2. La concentración de dióxido de carbono en la atmósfera ayuda a determinar la temperatura de la superficie terrestre. Tanto el CO_2 como la temperatura han aumentado marcadamente desde 1950.

La deforestación y la quema de combustibles fósiles han subido el nivel de CO_2, en los últimos 140 años en casi 100 partes por millón. La temperatura superficial promedio del hemisferio norte ha reflejado el aumento de CO_2. 1990 fue la década más cálida desde mediados del siglo XIX; 1998 se consideró el más caliente.

El clima fluctúa entre periodos cálidos y fríos; pero el siglo XX vivió el mayor calentamiento en al menos mil años, inexplicable sólo por las fuerzas naturales. El aumento de CO_2 y otros gases que absorben calor en la atmósfera ha contribuido; se espera que los gases de efecto invernadero y las temperaturas sigan en aumento.

El Ártico se calienta varias veces más rápido que la mayoría del planeta: su hielo se está derritiendo en mar y tierra. La liberación de agua dulce hacia el interior de los océanos podría modificar el curso de corrientes con un papel vital en el clima. El escurrimiento de los glaciares a tierra está contribuyendo a elevar el nivel global del mar.

Para el siglo XXII algunas líneas costeras podrían migrar tierra adentro y desplazar ciudades. Siberia y el norte de Canadá podrían experimentar un clima más húmedo y cálido. Otras regiones sufrirían sequías más frecuentes y severas. El tomar medidas para detener las emisiones de gases de efecto invernadero podría limitar el impacto.

El calentamiento climático azota las regiones frías en parte al albedo o reflexión luminosa. El albedo del hielo y la nieve es alta y refleja mucha energía solar. A medida que el calor derrite la nieve y el hielo, la tierra o el agua, que son menos reflejantes, quedan expuestas y se absorbe el calor, con el ulterior derretimiento y calentamiento.

La elevación del nivel del mar no es el único cambio por el que los océanos de la Tierra pasan. Un experimento de Circulación Oceánica Mundial que se inició en 1990, el cual duró 10 años, ha ayudado a entender lo que se llama “corriente de transportación oceánica”.

Los océanos proporcionan al planeta una circulación vivificante. Las corrientes oceánicas, impulsadas principalmente por vientos predominantes y diferencias en la densidad del agua, la cual cambia con la temperatura y salinidad de agua del mar, son cruciales para enfriar, calentar y regar la superficie terrestre del planeta, transfiriendo calor desde el Ecuador hasta los polos.

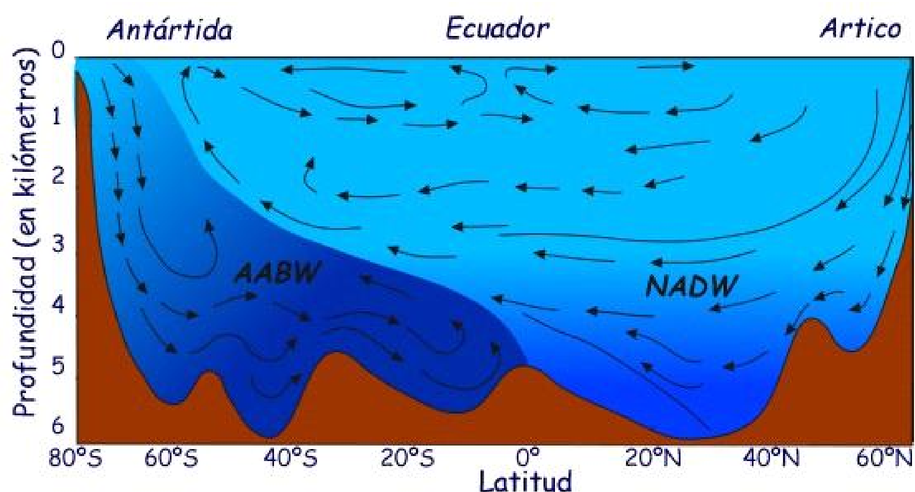
La circulación termohalina, es transportada por una máquina la cual es accionada por la densidad. El agua cálida y salada fluye desde el norte tropical Atlántico hacia el polo en corrientes superficiales como la Corriente del Golfo. Esta agua salina cede calor al aire, juntos lo frío del agua y su alta salinidad hacen a esta más densa y se hunde profundamente en el océano.

El agua superficial se desplaza para sustituirla. Las aguas frías y profundas fluyen a los océanos Atlántico sur, Índico y Pacífico, y finalmente se vuelven a mezclar con agua cálida y suben regresando a la superficie.

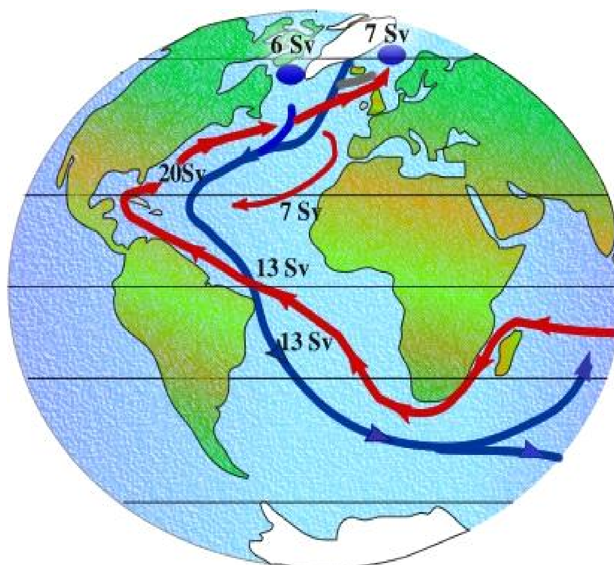
Dependiendo de cuán drásticos sean, los cambios en la temperatura y salinidad del agua pueden tener efectos considerables en la corriente transportadora oceánica.

Los océanos son importantes sumideros o centros de absorción de dióxido de carbono; son ellos quienes recogen alrededor de la tercera parte del CO_2 que generamos los humanos.

Charles Keeling en 1950, realizó una investigación que le llamó la respiración de la Tierra, comenzó a medir el CO_2 sobre el Mauna Loa, en Hawai, en donde le llamó la atención que los niveles de CO_2 aumentaban y disminuían estacionalmente. En la primavera y el verano las plantas toman CO_2 durante la fotosíntesis y producen oxígeno en la atmósfera. En otoño e invierno, cuando las plantas se pudren, liberan cantidades mayores de CO_2 a través de la respiración y la descomposición.



Corte vertical esquemático de las aguas y corrientes profundas en el Atlántico en la actualidad. En el circuito termohalino el agua superficial se hunde en las latitudes altas. En las cercanías del Ártico se forma la masa de agua denominada NADW (*North Atlantic Deep Water*) y en las cercanías de la Antártica la masa de agua, aún más densa, denominada AABW (*Antarctic Bottom Water*) (figura 4)



Circulación termohalina en el Atlántico. La corriente superficial más importante circula hacia el norte (en rojo). El agua se hunde en los Mares Nórdicos y en el Mar de Labrador. Desde allí, el flujo en niveles intermedios y profundos transporta agua hacia el sur (en azul). Los caudales son enormes. Vienen dados en sverdrups (1 sverdrup = 1 millón de metros cúbicos por segundo). No se representa en la figura el hundimiento de agua en algunas zonas próximas a la Antártica (Mar de Wedell y Ross). (figura 5))

El nivel de CO_2 no sólo fluctuaba estacionalmente, también aumentaba año tras año. El nivel del dióxido de carbono se ha elevado de 315 partes por millón (ppm) según lecturas de Keeling en 1958, a más de 375 ppm en la actualidad.

Una fuente primaria de este aumento es sin duda la descomunal quema que hacemos los humanos de combustibles fósiles basados en carbono para las fábricas, casas y vehículos.

Tans, otro investigador, menciona que desde el año 1000 a la fecha los niveles de los tres gases de efecto invernadero son claves: metano, óxido nitroso y dióxido de carbono. Estos tres gases ayudan a mantener la Tierra, que de otro modo sería una roca inhóspita y fría en órbita con un clima moderado por la orquestación de la radiación de calor de la Tierra al espacio (que enfría al planeta) y la absorción de radiación en la atmósfera (que es atrapada cerca de la superficie y por tanto calienta el planeta).

Los gases de efecto invernadero se encuentran en la raíz de nuestro cambiante clima. “Estos gases son un impulsor del cambio climático”.

Desde los pingüinos hasta las flores alpinas, algunas de las plantas y los animales del mundo se están adaptando al calentamiento global, pero otros, sencillamente, no pueden lograrlo.

Sin escape alguno. El coral decolorado, las migraciones de tiempo y los bosques muertos se encuentran entre los complejos efectos del calentamiento climático mundial.

La península Antártica es visitada por el ecólogo Bill Fraser. En este rincón de la Antártica, la tierra, el mar y las criaturas que lo habitan se han puesto en movimiento como resultado de algunos de los calentamientos más rápidos que hay sobre la tierra: las temperaturas invernales en la región se han elevado en casi 5°C en el último siglo.

La península Antártica occidental se ha calentado tan drásticamente, tanto por el incremento en las temperaturas mundiales como por los cambios regionales en las corrientes oceánicas y aéreas. Las temperaturas se han elevado en todo el mundo con más lentitud en un promedio de 0.6°C en el último siglo, pero ese cambio relativamente pequeño está causando estragos en todo el mundo natural.

El incremento de las temperaturas puede afectar profundamente los ecosistemas de todo el planeta, donde animales, plantas y los insectos se están adaptando a ese cambio climático moderado modificando sus territorios, adelantando las fechas de migración y alterando sus épocas de apareamiento y florecimiento.

Aunque el clima de la Tierra siempre se ha encontrado sujeto a variaciones naturales, con transiciones entre el frío y el calor, la tendencia actual de calentamiento tiene preocupados a los ecólogos por varias razones. Parece ser que los humanos son quienes están acelerando el cambio, y el calentamiento podría darse de una manera tan rápida que las especies no tendrán tiempo de adaptarse y evitar la extinción. Y dado que las distintas especies reaccionan al cambio climático de formas diferentes, los ciclos naturales de las criaturas interdependientes -tales como las aves y los insectos de los que se alimentan- podrían perder su sincronía, causando así disminuciones en su población.

Mientras se calienta gran parte del mundo, los animales y las plantas pueden vencer el calor retirándose a latitudes y niveles más altos. Pero estas rutas de escape tienen sus límites, algunos de ellos impuestos por los humanos. A diferencia de los últimos milenios, la flora y la fauna deben arreglárselas en un mundo que no solo se calienta, sino que es el hogar de 6,300 millones de personas.

Al incrementarse las temperaturas, las señales de las estaciones se alteran y la vida cambia en tiempo y espacio. Los habitantes están cambiando junto con los tiempos de los procesos anuales, tales como el florecimiento, el brote de las hojas, la migración y los nacimientos. Las especies que dependen una de la otra no siempre se adaptan a los cambios al mismo tiempo. En algunos casos están perdiendo sincronía de manera riesgosa.

En la península Antártica occidental ha caído más nieve en las últimas décadas, un fenómeno vinculado, por extraño que parezca, al incremento en las temperaturas: al haber menos hielo que cubra los océanos, el agua de mar se evapora más, lo que se traduce en nevadas más intensas.

En la cima del mundo, en el Ártico, el cambio climático es también paulatino, los animales como las aves parecen estar sintiendo los efectos. Las temperaturas se han elevado, el hielo marino permanentemente ha ido disminuyendo de un 9 % por década desde 1978, cuando se inició un monitoreo satelital de la capa glacial. Para los animales que pasan la mayor parte del año viviendo y alimentándose en el hielo como los osos polares y las focas anilladas, si continúa la pérdida del hielo marino esto podría ser desastroso. Se tiene el temor de que los varios miles de osos polares de la bahía de Hudson, parte de la población mundial calculada en 25 mil, desaparezcan si, como lo han pronosticado los climatólogos, el hielo marino se esfuma de la bahía para 2070. Si las temperaturas continúan subiendo y el hielo marino continúa fundiéndose, los osos de la bahía de Hudson se enfrentarán a un futuro sombrío.

El Parque Nacional Glaciar en Montana es un lugar bello. Tiene precipicios altísimos, cadenas con picos, y valles profundos. Todas estas características fueron creadas por medio del hielo.

Así es: el hielo talló las piedras. Por supuesto, pedacitos pequeños de hielo no podrían hacer todo eso. Sin embargo, capas de hielo gigantescas pueden hacerlo y ciertamente lo hicieron. El hielo todavía cubre algunas partes del parque.

f) La ocupación del hielo

Las capas de hielo se forman cuando hay más nieve que cae en el invierno que se logra derretir en el verano. Año tras año, la nieve se va acumulando. Montones enormes de nieve acumulada cubren la tierra. Las capas de nieve que se encuentran debajo lentamente se transforman en hielo.

Cuando el hielo acumulado llega a pesar mucho, éste comienza a moverse cuesta abajo. Es entonces cuando una capa de hielo se transforma en un glaciar. La gente describe a los glaciares como "ríos de hielo." Algunos glaciares antes medían casi una milla de grueso. Solamente las montañas más altas clavaban estas capas de hielo gigantescas.

Este fenómeno ha estado ocurriendo en el Parque Nacional Glaciar por millones de años. Los glaciares se han movido lentamente por la tierra, cambiando el paisaje con su paso. Ellos araron la tierra, pulieron las montañas y tallaron los valles.

Pero los glaciares no duran eternamente. El clima se calienta y ellos se derriten. Eso pasó en el Parque Nacional Glaciar hace diez mil años y está ocurriendo de nuevo hoy mismo.

Hoy en día, hay 26 glaciares que cubren partes del parque. Esos glaciares todavía están cambiando la tierra.

Los glaciares del parque, sin embargo, se encuentran en peligro de derretirse por completo. El Glaciar Grinnell, por ejemplo, es el glaciar más famoso del parque.

En 1910, el Glaciar Grinnell cubría aproximadamente 440 acres. En 1931, se había reducido a 290 acres. En 1998, solamente quedaban 180 acres. El agua del glaciar ha formado un nuevo lago en el parque.

A este paso, el que una vez fue el inmenso Glaciar Grinnell pronto puede desaparecer completamente. De igual manera podrían desaparecer los otros 25 glaciares del parque.

g) Marcas en el tiempo

Éstas son las causas del cambio climático y ésta, la respuesta a la pregunta de si podría acontecer una catástrofe climática de la noche a la mañana.

Al comparar cientos de miles de años de datos sobre el clima provenientes de glaciares, cuevas y arrecifes de coral con algunas predicciones diseñadas por las supercomputadoras más poderosas del mundo Sume a estos cálculos una considerable dosis de gases invernadero y tendrá un inquietante pronóstico.

Cathy Whitlock, paleoclimatóloga y experta en fósiles de polen, extrae de las orillas pantanosas del lago Little, en la cordillera de la costa central de Oregon, un tubo con muestras de lodo viejo cuyo color café intenso indica que se encuentra lleno de materia orgánica, especialmente de polen. En ese polen se encuentran las pistas de uno de los enigmas más grandes que enfrentan los investigadores, los súbitos cambios climáticos por los que atraviesa periódicamente nuestro planeta.

No interesan las fluctuaciones de 100 mil años entre una Tierra glacial y una más cálida que han ocurrido durante el último millón de años aproximadamente, sino los cambios más rápidos, como cuando la Tierra pasó bruscamente de una era de hielo a un clima agradable y, de nuevo, al frío y regreso a la primavera.

Científicos se han enfocado en los registros humanos, utilizando las inscripciones arqueológicas, los diarios climatológicos de jardineros y viticultores y las bitácoras de los capitanes de barcos. Se necesitan registros tanto humanos como de la naturaleza, ya que se pretende comprender cómo funcionaba el clima antes y después de la aparición del ser humano. Podría ser ésta la única manera en que se sabría qué impacto tienen las personas en el clima.

Los estudios que ha realizado Cathy con los núcleos extraídos de lago Little, podrían mostrar la celeridad con que se dan los cambios. Cada metro de lodo representa cerca de 2,300 años de acumulación de granos de polen procedentes de árboles, hierba y plantas en floración. Para encontrar el polen en el lodo se extraen varias muestras de cada núcleo, se coloca el lodo en una bandeja donde recibe un baño químico que disuelve todo menos los miles de granos de polen invisibles. En un portaobjetos para microscopio se coloca una gota de polen en donde se "leen" alrededor de 300 granos, identificando la especie de cada uno. Este proceso permite rastrear la manera en que la vegetación de la cordillera de la costa cambió durante las variaciones climatológicas del pasado.

Se encontró un lecho de roca en el lago a unos 18.25 metros; el polen en ese nivel data de casi 42 mil años. Un deslizamiento de tierra que bloqueó un arroyo antes de la última era glacial fue lo que dio origen al lago Little. El polen que se encuentra en sus sedimentos lodosos, nos dice cómo era el medio ambiente de la costa de Oregon antes y en la cúspide de esa glaciación y cómo sufrió un calentamiento hace alrededor de 13 mil años.

Solamente existen dos tipos de polen en esta muestra: los granos grandes de las piceas Engelmann y los granos más pequeños de la cicuta de montaña. La picea no crece actualmente en la cordillera de la costa, pero sí el abeto Douglas que es la conífera dominante. Pero no hay polen del abeto en la muestra pues éste apareció hasta casi el final de la última glaciación. Aparece de pronto y desaparece; esto ocurre en un período de 200 a 500 años; desaparece todo un bosque y otro toma su lugar. Parece que la respuesta está en los núcleos de hielo.

En Groenlandia se obtuvieron por primera vez en la década de 1960, núcleos de hielo que proporcionaron a los científicos las primeras pistas de los rápidos cambios climáticos. El hielo que se ha ido acumulando allí de manera inalterable durante más de 100 mil años, conserva uno de los mejores registros de asuntos como temperaturas del pasado, cantidad de precipitación y condiciones atmosféricas.

Estos núcleos fueron combinados con núcleos más antiguos procedentes de la Estación Vostok en la Antártica, mostrando los núcleos de Groenlandia los periodos largos de frío que se esperaban, los cuales fueron aumentando gradualmente, seguidos por lapsos cálidos más cortos. Revelando también que dentro de los periodos largos y fríos, hubo ciclos cortos de calentamiento y enfriamiento. Estos cambios cortos eran como estallidos que originaban que el clima fluctuara de frío a caliente y de nuevo a frío, a veces en tan sólo unas décadas.

Los cambios climáticos repentinos han ocurrido a lo largo de la última glaciación: de 70 mil a 11,500 años atrás. En el pináculo glacial, gran parte de América del Norte, Europa, regiones de Rusia y la Antártica fueron cubiertas por grandes capas de hielo que se derretían periódicamente y luego volvía a avanzar, hasta que llegó el último derretimiento: lo que marcó el inicio de la llamada época reciente, más cálida y climatológicamente más estable, conocida como el Holoceno.

Esta transición inició con un calentamiento abrupto, probablemente la causa de la súbita alteración en el bosque de Whitlock. Regresando nuevamente al cambio de épocas frías, y otro calentamiento hace unos 11,500 años. En este último salto, la temperatura de la superficie de Groenlandia aumentó 8 °C en una sola década. Este repentino calentamiento derritió glaciares terrestres de miles de años de antigüedad en tan sólo unos cientos de años en ambas costas del Atlántico norte.

En la última glaciación, la corriente de transportación oceánica disminuyó su velocidad; Irlanda se parecía mucho más a Alaska: los glaciares cubrían las montañas y se extendían por la tierra hasta el mar. Pero cuando surgía un clima y la helada terminaba momentáneamente, los glaciares de Irlanda comenzaban a replegarse con rapidez. El agua de los hielos cubría las tierras, abriendo profundos canales de las dimensiones de un río y vertiendo en el mar una pasta aguada de lodo. “Estos sucesos fueron en gran escala”.

Conforme el lodo se asentaba, se iban enterrando en los sedimentos diminutos organismos llamados zooplancton. Actualmente el nivel del mar se encuentra más abajo que en el pasado, debido a que la tierra ya no tiene el peso del hielo; esos depósitos lodosos en los acantilados se encuentran a unos 80 metros sobre el océano, en donde un geólogo puede encontrar los fósiles del zooplancton cubierto de conchas, llamado foraminífero o foram. Los forams son parte de la investigación paleoclimatológica, sus conchas calcáreas pueden ser fechadas y así averiguar su antigüedad. Al fechar los forams del lodo de la costa del mar de Irlanda, se encontraron pruebas de un rápido incremento de 10 metros en el nivel global del agua hace 19 mil años. “Eso fue un derretimiento del hemisferio norte, una retirada de todo el margen de hielo”.

El geólogo Peter Clark, dice que pudo haber sido el peso del mismo hielo. Mientras crecían las capas de hielo, su mayor peso empujó la tierra subyacente hacia abajo. Los glaciares se hundieron lo suficiente para llegar al nivel del mar, flotando y rompiéndose después en iceberg. “Esto añadió más agua dulce al océano, cambiando su salinidad y las corrientes profundas”.

Una cantidad mayor de agua dulce en el Atlántico norte, habría reducido la velocidad de la corriente de transportación oceánica y disminuido el porcentaje de agua cálida arrastrada desde los trópicos, cambiando la dinámica de la circulación y la temperatura oceánica, tan lejos hacia el sur como la Antártica. Esa agua dulce fría adicional de la Antártica provocaría, a su vez, que las corrientes tropicales cálidas fluyeran de regreso hacia el norte, dando inicio a la corriente de transportación del Atlántico norte. Nuevamente, las capas de hielo del hemisferio norte habrían comenzado a derretirse.

No todos están convencidos de que la corriente de transportación del Atlántico norte sea el único catalizador de los repentinos cambios climáticos en la Tierra. “Quizás sea cierto para los lugares más altos, pero no para los trópicos”.

“Existe una inclinación en la visión de los cambios climáticos que otorga mayor importancia a los sucesos ocurridos en el hemisferio norte”. Esta inclinación se debe a la recolección de datos de seis mil metros de núcleos de hielo que provienen de glaciares que coronan las cimas de picos en los Andes, el Himalaya, Alaska y el monte Kilimanjaro, dice Lonnie Thompson a quien otorgan el crédito de haber conseguido los mejores registros paleoclimáticos de la zona tórrida: las latitudes situadas entre el Trópico de Cáncer y el Trópico de Capricornio.

Estos núcleos se encuentran guardados en cilindros plateados de cartón y apilados en anaqueles cubiertos por escarchas, manteniéndolos a una temperatura de -30 °C. Este frío es necesario para preservar lo que ya ha desaparecido o lo hará pronto: la historia climatológica de los trópicos. Las fuentes de estos registros se están derritiendo debido al aumento de los gases del efecto invernadero en la atmósfera, parte de ese hielo que se ha recogido y se tiene allí ha ido

desapareciendo de las montañas.

En los últimos 150 años, el aumento de la cantidad de los gases del efecto invernadero en la atmósfera terrestre ha aumentado enormemente atrapando más calor, causando que se eleven las temperaturas y que se derritan los glaciares en todo el mundo.

“Olvidamos que la Tierra es un globo y que el 50 % de la superficie del planeta se encuentra en los trópicos. Éstos son una fuente importante de calor, y desempeñan un papel mucho mayor del que se piensa en la dirección de los cambios climáticos”.

Un estudio realizado a un núcleo de hielo que fue sacado de la montaña Sajama, en Bolivia, denso y blanco con ligeras variaciones, muestra imperceptibles bandas como anillos que indican las acumulaciones anuales de nieve. Este núcleo demuestra que en realidad hubo cambios climáticos en los trópicos de la misma magnitud que los experimentos en Groenlandia durante las glaciaciones.

Al estudiar un núcleo de las famosas y antiguas nieves del monte Kilimanjaro, se encuentra que es denso y blanco, al igual que el núcleo de Sajama, excepto por una gruesa banda de dos centímetros, que es negra. “Este es polvo –describe Thompson- de hace 4,200 años, cuando hubo una sequía de 200 años en el norte y este de África. “La atmósfera superior debió haber estado llena de arena, suciedad y polvo mezclándose todo con la nieve, a medida que caía sobre el Kilimanjaro”.

Según inscripciones de jeroglíficos de ese periodo describen cómo el Nilo no creció durante 50 años. Los egipcios murieron de hambre por la sequía; por esa época finalizó el reino Antiguo de Egipto, comenzando un periodo de inquietud social y política.

Ello demuestra lo que puede ocasionar el cambio climático. Éste fue un acontecimiento abrupto, pero natural, cuando solo existían 250 millones de personas en el mundo. Ahora somos 6,300 millones y estamos cambiando el clima.

Cambio climático global, es común identificarlo con el calentamiento global del planeta, el cual es resultado de la acumulación de gases de invernadero en la atmósfera, cuyas causas se encuentran en diversas actividades, involucra también las distintas escalas de variación climática natural, y se refiere a aquellos cambios que ocurren entre un año y otro.

En los océanos, la temperatura ambiental es uno de los parámetros mas ampliamente utilizados, y permite comparar las condiciones promedio de los océanos de todo el planeta desde la mitad del siglo XIX. Registro del clima que se realizan con diversos instrumentos disponibles desde hace relativamente pocos años. Basándose en la medición mensual de cada factor, lo cual permite calcular las anomalías mensuales, es decir, la desviación de un mes cualquiera con respecto del promedio de todos los meses iguales en toda la serie. El aspecto que nos marca es la gran variabilidad de datos existentes, pues prácticamente cada uno es diferente de los demás: la información anual rara vez es resulta igual.

Estas variaciones tienden a ser cíclicas, y de ellas se han descrito tres escalas: 1) de alta frecuencia menor a 10 años se relaciona sobre todo con la ocurrencia de los fenómenos El Niño y La Niña, 2) por décadas entre 10 y 20 años, 3) de baja frecuencia o de variación del régimen, mayor a 50 años.

Estas variaciones son naturales, no efecto de la actividad humana, e investigarlas implica dedicación. A partir de estudiar el grosor de los sedimentos y los niveles antiguos de lagos en

depósitos de miles años, indicadores indirectos se relacionan con etapas de mayores o menores lluvias en ciertas áreas, consecuencia de los cambios provocados por los fenómenos.

La escala de variación decenal se ha estudiado a través el método de Oscilación Decenal en él pacifico (PDD), el cual permitió la reconstrucción de esta variable con base en el grosor de añillos de crecimiento de árboles desde mediados del sigo XVII.

La variación de baja frecuencia se describió a partir de sus efectos sobre la abundancia de las poblaciones de sardinas en algunas regiones del océano: los cambios en la cantidad de escamas en los sedimentos laminados demuestran que esta variación ha existido al menos durante los últimos 2,000 años. Se han descrito otros ciclos de variación natural de periodos mucho más largos. Los más conocidos son los de las glaciaciones y las etapas interglaciares, cuya causa reside en los cambios en los movimientos de la Tierra alrededor del Sol y ocurre en periodos de miles de años; los descubrió y explico cíclicamente el astrónomo serbio Milutin Milankovitch (1879-1958). En escalas intermedias y menos intensas, una época más cálida que el promedio ocurrió entre los siglos X y XIX. Se le conoce como calentamiento medieval, y termino con la pequeña glaciación, lapso de enfriamiento desde mediados del siglo XIV hasta el XIX.

Al revés de las escalas de variación descritas arriba, el calentamiento global por acumulamiento de gases con efecto de invernadero en la atmósfera no es ni cíclico ni natural: es una tendencia que se inicio durante la revolución industrial de mediados del siglo XIX, con el uso cada vez más intensivo de combustibles fósiles.

h) La tierra esta sufriendo.

Sin embargo, el 16 de febrero del 2005 se ratificó el Protocolo de Kyoto, el tratado mundial más ambicioso en defensa del medio ambiente. Con su vigencia, comenzará una nueva era, basada en una economía diferente, lo que junto con un nuevo y necesario paradigma ético, constituye condiciones para el desarrollo sostenible. Este Protocolo establece legalmente objetivos vinculantes para recortar las emisiones de gases de efecto invernadero, producidos por las naciones desarrolladas. El objetivo es reducir, entre 2008 y 2012, un promedio de 5,2 por ciento de las emisiones a la atmósfera con respecto a los niveles de 1990 de los seis gases que generan el efecto invernadero: dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorocarbono, perfluorocarbono y hexafloruro sulfúrico. Sobre todo, del hemisferio norte, donde se encuentran los países desarrollados –no obliga a los países del hemisferio sur o subdesarrollados- cada país, sin embargo, tiene una cuota diferente.

En el mundo, se emiten unas 600.000 toneladas de dióxido de carbono al año. Una cifra que crece sin freno debido al estilo de vida humana, basada en el consumo de combustibles fósiles, como el petróleo, el carbón o el gas.

Los expertos coinciden en que prácticamente cualquier actividad humana es contaminante: desde la luz eléctrica que se utilizan en los hogares, pasando por el uso de los automóviles, el aire acondicionado, la calefacción, hasta la industria siderúrgica, refinerías petroleras o cementeras.

Sólo el uso del petróleo y otras energías fósiles son responsables del 80% de las emisiones de gas carbónico, que actúa como una pantalla reflectante para el calor que emite la tierra y lo envía de vuelta a ésta.

Veamos que se firmó: Se permite un cierto nivel aceptable de contaminación y se establece un mecanismo financiero, los créditos de carbono, por el cual quienes contaminan de más le pueden comprar una parte del derecho a contaminar a los que contaminan menos.

La entrada en vigencia del Protocolo de Kyoto es, sin duda, un paso muy importante pero no decisivo en la difícil relación de nuestras sociedades con los cambios del clima.

Lo bueno es que hay un compromiso internacional de ocuparse del cambio climático, reduciendo las emisiones contaminantes. Esta decisión requiere de un alto compromiso de la sociedad en su conjunto: los ciudadanos, a partir de la recepción de información adecuada, capacitación y conocimiento para contribuir en lo posible, comenzando por los cambios de usos y patrones de consumo; el sector empresarial, en la toma de decisiones que conduzcan a beneficios basados en una responsabilidad social y ambiental, y el poder público, a través del desarrollo y la puesta en ejecución de políticas y medidas adecuadas, a la vez que permanentes.

Lo malo es que nadie está seguro de se logre una mejora perceptible, y ni siquiera de que muchos de los firmantes cumplan con sus compromisos. Ya se dice que Canadá resolverá su problema en el mercado financiero y no en las chimeneas. El acuerdo entra en vigor sin la participación de China y los Estados Unidos de Norteamérica, dos piezas claves para cualquier política de reducción de gases industriales.

El presidente francés Jacques Chirac instó a los países desarrollados a que para el 2050 dividan por cuatro las emisiones de gases de efecto invernadero. En una mesa redonda sobre el cambio climático que se realizó en el Palacio del Elíseo, Chirac dijo que, sin esperar al 2012, desea que Francia intente ir más allá del compromiso de Kyoto. A nivel europeo sugirió que se refuercen las normas contra la contaminación de los vehículos y el transporte aéreo. Para el corto plazo, el presidente francés sostuvo que el primer objetivo del 2005 debe ser el de hacer que Estados Unidos vuelva a comprometerse en el esfuerzo internacional de lucha contra el cambio climático.

Estados Unidos –el mayor contaminador del mundo- continúa sosteniendo que el Protocolo no es de interés para su país debido a los supuestos daños que va a acarrear al cumplimiento de su economía. El presidente George W. Bush se limitó a prometer que apoyaría las reducciones de gases únicamente mediante las acciones voluntarias y el desarrollo de nuevas tecnologías.

En lugar de preguntarnos si tenemos o no que ver, ¿No deberíamos plantearnos si no hay que hacer algo? Estas no son proyecciones, sino hechos reales. Muchos de los procesos señalados ya han ocurrido en la Tierra. Es cierto. ¡Pero a lo largo de milenarios tiempos geológicos! No en el lapso que equivale al de una vida humana. Y si efectivamente fueran naturales, ¿Nos quedamos de brazos cruzados para ver a la Estatua de la Libertad cubierta de nieve como en la película “El día después de mañana”?

La Tierra esta sufriendo de fiebre y está no es una buena señal. La culpa es de todos. De la sociedad humana, con sus perversiones, su irresponsabilidad, su corrupción, sus intereses, su egoísmo, su hipocresía.

Si la Tierra está molesta, cada vez más enojada, es por culpa de todos. Cada vez le hacemos más daño. Y cuando la culpa es de todos, no significa que ella no sea de nadie en particular. Es de cada uno, según su grado de responsabilidad.

Estamos muy enfermos, y no nos damos cuenta. Enfermos de soberbia, de materialismo, de codicia. Pero podemos reaccionar. Podemos hacer un examen de conciencia; entrar en conversiones con nuestro ser profundo, con la parte elevada que hay dentro nuestro y ver si podemos cambiar, aunque sea en algo. Antes de que sea demasiado tarde.

El ozono también juega un papel muy importante y natural en la atmósfera superior (llamada ***estratosfera***) . En la atmósfera superior el ozono actúa como un escudo contra la dañina radiación solar ultravioleta (UV). Las reducciones del ozono estratosférico dan como resultado un incremento de la peligrosa radiación ultravioleta que llega a la superficie terrestre. Noventa por ciento del ozono atmosférico se concentra entre 10 y 40 kilómetros por sobre la superficie del planeta. Los destructores más grandes del ozono en la estratosfera son los compuestos químicos (clorofluocarbonatos - CFC) producidos por el ser humano que actúan como gases tipo invernadero en la atmósfera inferior. Las temperaturas estratosféricas extremadamente frías sobre los dos polos - Norte y Sur- combinados con la radiación solar y la circulación atmosférica, amplifican el impacto de las reacciones químicas que destruyen el ozono, resultando en "agujeros de ozono" sobre la Antártida



Fotografía 1 explotación de energéticos.

Descripción de socavación.

Una corriente de agua que se desplaza en su cauce o en una zona de inundación tiene una cierta capacidad de suspender y arrastrar partículas sólidas que constituyen el lecho sobre el que ocurre el flujo. Este movimiento de material sólido en corrientes aluviales es un fenómeno complejo que depende de diversos factores, tales como la configuración geológica y topográfica del cauce, las características del material de arrastre y las características hidráulicas de la corriente. Esto produce la llamada socavación normal en el lecho de la corriente. Cuando se coloca un obstáculo dentro del cauce, como una pila de apoyo de un puente, se modifican localmente las condiciones de escurrimiento, cambiando en consecuencia la capacidad de arrastre en la zona vecina a la obstrucción. Si esta capacidad es mayor que la proporción con que la corriente alimenta a la zona con material sólido, se producirá en ésta una socavación adicional a la normal de la corriente; en caso contrario se producirá un depósito.

Es evidente que el conocimiento de la profundidad a que puede llegar la socavación total y las características de este fenómeno son de fundamental importancia para el diseño de cimentaciones poco profundas, en el caso de puentes y aún de otras estructuras construidas en zonas inundables. Innumerables fallas de puentes han ocurrido cuando la profundidad de desplante de las pilas ha quedado arriba del nivel alcanzado por la socavación normal, más la adicional impuesta por los obstáculos que la cimentación representa.

El problema de determinar el poder de socavación normal de una corriente es uno de los más complicados a los que puede enfrentarse el ingeniero, pues la socavación producida durante al aumento de capacidad de arrastre que el río adquiere en creciente por aumento de velocidad, se rellena cuando la corriente vuelve a su estado normal, no quedando huella aparente del fenómeno.

En muchos ríos, la profundidad normal de socavación es del orden de la diferencia de los tirantes en condiciones ordinarias y en creciente máxima, pero este dato no puede considerarse regla confiable. Pues se han encontrado corrientes en que la socavación alcanza el triple y aún más de tal valor y otros casos en que, por el contrario, dicho valor es exagerado.

La socavación en un tramo de una corriente natural es la suma de las dos componentes, la socavación general y la local.

La socavación local tiene dos componentes, la producida por el paso de crecientes y la correspondiente a la construcción de obras civiles. Para calcular la primera existe un sinnúmero de formulas, que son modificadas continuamente por sus autores, a medida que se avanza en la experimentación de campo. Se basan principalmente en el efecto de la fuerza tractiva sobre la carga de fondo.

Las carreteras constituyen la principal vía de transporte de personas, alimentos, insumos y otros en el Perú. La accidentada geografía de este país, sumada a la falta de recursos financieros ha ocasionado que existan sistemas viales tales como las vías de penetración que, en algunos casos, son la única conexión entre ciudades de mayor tamaño y las de menor tamaño. La interrupción de los caminos ocasiona problemas de índole económico, social, político y emocional en las poblaciones afectadas. En la mayoría de casos, los problemas son recurrentes y son ocasionados por fenómenos hidrometeorológicos durante la temporada de lluvias.

Los autores de este artículo son ingenieros civiles que han concentrado sus actividades académicas y profesionales en el campo de los recursos hidráulicos, pero un porcentaje significativo de los trabajos realizados por los mismos está orientado al drenaje de carreteras. Debido a que esta ponencia forma parte del XVI Simposio “Alternativas para la prevención y Mitigación de Desastres”, que organiza el CISMID de la UNI, al cual asisten planificadores e ingenieros civiles de todas las especialidades, se ha orientado el tema de manera general para exponer los problemas encontrados en el diseño de vías relacionados con el manejo de aguas. Este artículo debe tomarse como una contribución inicial en la que seguramente habrá omisiones por motivos de espacio y tiempo y que será enriquecida con las experiencias personales y grupales de otras personas.

Generalidades.

Los principales factores que actúan en el fenómeno de socavación, que podrían ocurrir en los depósitos aluvionales existentes sobre el contorno estructural rocoso, bajo la influencia del caudal del río y respectivas velocidades e incidentes naturales, provocados por fuertes lluvias, por consecuencia conllevan al arrastre de materiales.

Se han intentado soluciones teóricas del problema, pero dadas las incertidumbres envueltas, su valor es hasta cierto punto dudoso. La otra fuente de conocimiento disponible es la que emana del análisis de corrientes reales o de experimentos en modelos de laboratorio; estos estudios son los más prometedores y de hecho han rendido ya resultados prácticos muy satisfactorios.

Las fuerzas involucradas en formar y mantener al cauce están relacionadas con la corriente

del fluido. El paso del fluido ejerce una fuerza erosiva en ambos, el lecho y la orilla y es este abrirse paso mediante la fuerza erosiva lo que causa que las partículas contenidas en el lecho y la orilla sean arrastradas por el agua, esto es mediante empuje, rodamiento y rebote. Esta porción de escombros transportados es lo que se conoce como carga de fondo. La misma fuerza erosiva crea los turbulentos remolinos en el fluido que corre y que arrastran algunas partículas de material y las arrojan en la masa principal del fluido, transportándolas de esta manera como carga en suspensión.

Uno de los problemas básicos del estudio de los ríos es la identificación de una ley general o principio que provea una explicación en términos físicos para los diferentes tipos de unidad que muestran los cauces de los ríos y la red que los comprende así como los diferentes fenómenos mecánicos o naturales. Es muy fácil hablar tan sólo de los resultados de la acción dinámica de los ríos en términos antropométricos pues, en verdad los ríos parecen tener una tendencia inherente a mostrar muchas de las características de un organismo. En primer lugar existe una organización de las diversas partes. Todos los sistemas de ríos parecen tener básicamente el mismo tipo de organización, pudiendo diferir en detalles. El sistema de ríos es dinámico en tanto que tiene partes que se mueven y pueden causar incidentes y crear cambios. A menudo leemos en la prensa, como resultado, que un río tuvo un comportamiento violento rebasando sus márgenes y causando estragos en el hombre y sus estructuras. Así que uno tiende a hablar del río como si tuviera voluntad propia. Es interesante, entonces, desde el punto de vista filosófico, considerar algunos aspectos de estas características dinámicas que han sido usadas para expresar partes o la totalidad de las acciones del sistema el cual parece tener tendencias definidas hacia una dirección de desarrollo, o tendencias las cuales se inclinan a mantener las condiciones promedio observadas.

Existen obras de arte y otras estructuras que se construyen en las carreteras y que causan una falsa sensación de seguridad. Por ejemplo, en algunos casos se construyen muros de concreto como defensas ribereñas, sin tomar en cuenta los efectos de socavación que pueden ocasionar el asentamiento de una obra rígida que no se acomoda rápidamente a los cambios del terreno. El presente trabajo tiene como objetivo presentar a la comunidad de ingenieros civiles de diversas especialidades y planificadores los problemas potenciales relacionados con el agua que existen en una carretera. El origen del agua que discurre por debajo o por encima de una carretera es pluvial. Para fines de identificación y de clasificación se ha dividido el tipo de fallas en cuatro:

a) Fallas de origen antropogénico – debido a las acciones del ser humano.
b) Falla por flujo subsuperficial y subterráneo y afloramientos de agua.
c) Falla por flujo superficial – flujos dispersos.
d) Falla por erosión – defensas ribereñas y socavación en puentes.

En esta ponencia se denomina flujo subsuperficial al agua que se desplaza entre la superficie del terreno y la capa freática. Se denomina flujo subterráneo al flujo que discurre como parte del acuífero. El orden de los tipos de falla ha sido escogido con la intención de resaltar aspectos que no se toman en cuenta en los diseños de caminos. Los dos primeros tipos de falla son, por lo general, los que menos se consideran en el diseño de una vía, siendo el último el más evidente y (si cabe el término) espectacular.

Definitivamente existe un traslape con otras especialidades, tales como la hidrogeología, geotecnia y vías de transporte. La intención es presentar algunos de los problemas relacionados al agua y también iniciar la discusión sobre como evitar problemas que son recurrentes en el diseño, construcción, y mantenimiento de sistemas de drenaje vial y recoger las experiencias de otros colegas de manera tal que en el futuro contemos con vías más seguras y que ocasionen menores gastos de mantenimiento.

Todos estos factores determinan el interés principal para presentar este estudio de tesis.

I. TIPOS DE SOCAVACIÓN

La socavación que una corriente de agua produce en el cauce por el que circula, puede presentar diversas formas, de las cuales las más interesantes para el ingeniero son las que brevemente se describen a continuación.

a. *Socavación normal o general.*

Consiste en una disminución generalizada del nivel del fondo como consecuencia del incremento de la capacidad del flujo, al presentarse una creciente y es debido al aumento de la capacidad de arrastre de material sólido que en ese momento adquiere la corriente, en virtud de su mayor velocidad para transportar material durante las avenidas. Este es un fenómeno de proceso natural que puede ocurrir a todo lo largo del río donde no interviene la mano del hombre.

La erosión del fondo de un cauce definido por el cual discurre una corriente es una cuestión de equilibrio entre el aporte sólido que pueda traer el agua a una cierta sección y el material que sea removido por el agua de esa sección; en avenida, aumenta la velocidad del agua y, por lo tanto, la capacidad de arrastre.

La posibilidad de arrastre de los materiales de fondo en cada punto se considera, a su vez, dependiente de la relación que existe entre la velocidad media del agua y la velocidad media requerida para arrastrar las partículas que constituyen el fondo en cuestión. Para suelos sueltos, esta última no es la velocidad que inicia el movimiento de algunas partículas de fondo, sino la velocidad, mayor, que mantiene un movimiento generalizado; en suelos cohesivos, será aquella velocidad capaz deponerlos en suspensión.

La primera velocidad mencionada depende de las características hidráulicas del río: pendiente, rugosidad y tirante; la segunda de- pende de las características del material del fondo y del tirante. Como característica del material se toma el diámetro medio, en el caso de suelos no cohesivos y el peso específico seco, en el caso de los suelos cohesivos (en suelos friccionantes se suele considerar en la literatura del tema el mismo peso específico a todas las arenas y gravas, por lo que esta propiedad no puede usarse para diferenciarlas). El peso específico seco al que se ha hecho referencia corresponde al *yd* y se obtiene dividiendo el peso de los sólidos de la muestra (*w*s) entre el volumen original de la masa de suelo (*v*m). Naturalmente que un criterio tan simplista para definir las características de los materiales impone las correspondientes limitaciones en los resultados y conclusiones de las teorías elaboradas con tales ideas.

La erosión general puede llegar a producirse inclusive cuando el lecho del río es rocoso, con tal de que la velocidad de la corriente sea superior a la necesaria para producir el desgaste de la roca.

Un hecho curioso observado es que la socavación general disminuye para una misma velocidad media de la corriente, en fondos no cohesivos, cuando el agua arrastra en suspensión gran cantidad de partículas finas, del tamaño de limos y arcillas; el hecho se atribuye a la disminución en este caso del grado de turbulencia del agua, por aumento de su peso específico y de su viscosidad.

b. *Socavación en estrechamiento*

Se entiende por socavación en estrechamientos la que se produce por el aumento en la

capacidad de arrastre de sólidos que adquiere una corriente cuando su velocidad aumenta por efecto de una reducción de área hidráulica en su cauce. El efecto es muy importante en puentes, donde por lo común y por razones de economía suelen ocurrir las mencionadas reducciones, si bien puede presentarse en otros lugares del curso del río, en que un estrechamiento más o menos brusco tenga lugar.

Los cambios que la presencia de un puente impone a la corriente son principalmente los siguientes:

1, cambio de la velocidad del flujo del agua en el cauce principal y en el de las avenidas.

2. Cambio en la pendiente de la superficie libre del agua, hacia arriba y hacia abajo del puente. Cuando ocurre una avenida, aumenta la velocidad y, como consecuencia, la capacidad de transportar sedimentos. Esto origina un mayor arrastre del material del fondo en la sección del cruce y, cuando ello es posible, un ensanchamiento del cauce, hasta que éste aumento en el área hidráulica asemeje otra vez la sección del cruce con cualquier otra del río y restablezca el equilibrio de la corriente. Como quiera que por la presencia de los terraplenes de acceso, a veces protegidos, no suele ser posible que la sección del cruce gane área hidráulica por ensanchamiento, se sigue que la presencia del puente es de por sí un incentivo a la socavación de fondo, por lo menos hasta que la corriente restablezca el equilibrio de áreas hidráulicas entre la sección del cruce y las demás del río.

c. *Socavación transversal*

La reducción del ancho de la sección de un cauce ocasionada en forma natural o como consecuencia de una obra civil, es compensada por un incremento en la profundidad hasta el punto en el cual se alcanza la capacidad necesaria en la sección.

d. *Socavación en curvas*

Se genera en el fondo cercano al lado cóncavo de la curva o talud exterior debido al flujo helicoidal que se forma cuando el río cambia de dirección, esto es debe a la sobre elevación del nivel del agua en esta zona producida por la fuerza centrífuga, a caminar más aprisa que los situados más hacia el interior; como consecuencia, la capacidad de arrastre de sólidos de los primeros es mayor que la de los segundos y la profundidad de erosión es mayor en la parte del cauce exterior a la curva que en la interior. El efecto es importante y ha de ser tenido en cuenta en la construcción de puentes en curvas de río o en el diseño de enrocamientos de protección en los mismos lugares y tiene gran influencia en la divagación de corrientes, pues al disminuir la velocidad en el intradós de la curva aumenta el depósito en esta zona y, por ello, disminuye la zona útil para el flujo del agua, en tanto que en el extradós, al aumentar la profundidad y el área hidráulica, aumenta el gasto.

La socavación bajo un puente construido en una curva estable puede cuantificarse con los métodos para el cálculo de la profundidad de socavación general que más adelante se exponen, una vez conocido el perfil actual del río. Pero en el caso de que el puente esté en un tramo recto y exista la posibilidad de que una curva o un meandro avance y lo cruce, o bien si se desea rectificar un cauce en un tramo que comprenda al cruce de un puente y éste, tras la rectificación, queda sobre curva, será preciso calcular las nuevas profundidades de socavación que se puedan presentar en ese caso; con los datos del perfil del río en las nuevas condiciones, la nueva profundidad de socavación esperada podrá calcularse con los mismos métodos empleados para el cálculo de la socavación general.

Generalmente la profundidad máxima se observa en el tramo de la mitad de la curva hacia

aguas abajo, sin embargo y por su posición dependerá de la dirección del flujo a la entrada y su trayectoria a lo largo de la curva

e. *Erosión en márgenes*

Es la erosión que las aguas de una corriente producen en los materiales térreos deleznables o solubles que formen sus orillas; el efecto es especialmente peligroso en crecientes, por el aumento de poder erosivo de la corriente a causa de su mayor velocidad. La erosión de márgenes es causa de divagación y si el ataque se produce en estratos susceptibles situados bajo otros que no lo son, producirá embovedamientos causantes de inestabilidades en los taludes de la propia margen. El fenómeno se presenta en ríos encañonados y también en las corrientes marinas que bordean zonas costeras altas.

f. *Socavación en pilas de puentes*

La excavación adicional a la propia de la corriente producida al pie de las pilas de los puentes es debida a las modificaciones de las condiciones hidráulicas de escurrimiento que la presencia de la propia pila produce. En efecto, basta la desviación lateral de la corriente, causada por el obstáculo, para que aquélla adquiera un impulso en dirección vertical que, combina con el movimiento de avance da lugar a trayectorias descendientes que atacan el fondo, incrementando mucho la capacidad de arrastre de material sólido en la zona aguas arriba de la pila. En la cavidad así creada se produce un vórtice de eje horizontal que aumenta la erosión, hasta el punto en que se alcanza un nuevo perfil de equilibrio en el fondo del cauce.

La profundidad afectada por esta socavación varía con muchos factores que se refieren tanto a la corriente, como al cauce y a la propia pila. Las principales de estas características son el tirante y velocidad del agua, el tipo de suelo que forma el fondo del cauce la forma de la pila, su ancho y su inclinación con respecto a la dirección principal de la corriente.

g. *Socavación local en pilas*

Se presenta al pie de las estructuras interpuestas a las corrientes, sumergidas o que emergen de la superficie del agua, como resultado de la deflexión de las líneas de flujo, la turbulencia y la verticidad provocada por la presencia de obstáculos.

Cuando se coloca una pila de puente en la corriente de un río se produce un cambio en las condiciones hidráulicas de ésta, y, por lo tanto, en su capacidad para producir arrastre sólido. Si la capacidad de arrastre supera localmente el aporte del gasto sólido del río, ocurrirá en la pila una socavación local.

Es evidente que el conocimiento de la profundidad a que puede llegar este efecto erosivo es de fundamental importancia en el diseño de cimentaciones poco profundas para puentes, pues una falla seria de juicio en esta cuestión conlleva la destrucción total de la estructura o la adopción de profundidades antieconómicas y excesivas, que complican seriamente los procedimientos de construcción.

Los estudios realizados hasta la fecha permiten decidir que los parámetros que, en mayor o menor grado, influyen en la socavación local al pie de pilas de puente son los que se enlistan a continuación.

1. **Parámetros hidráulicos.**

Velocidad media de la corriente

Tirante frente a la cara de la pila

Distribución de velocidades

Dirección de la corriente respecto al eje de la pila

2. **Parámetros del material del fondo.**

Diámetro de los materiales

Curva granulométrica

Forma de los granos

Grado de cohesión o cementación

Peso específico sumergido

Estratificación del subsuelo

3. **Parámetros geométricos de la pila.**

Ancho de la pila

Relación largo-ancho

Sección transversal de las pilas

4. **Parámetros de ubicación del puente.**

Contracción en la sección

Radio de curvatura del tramo del río

Obras de control de gasto, haya sea construido aguas arriba o aguas abajo

5. **Parámetros del tiempo.**

Duración del pico de la avenida

Tiempo requerido para remover el material y alcanzar una condición estable

h. *Socavación local en estribos*

Desde el punto de vista de definición, la socavación local en estribos es análoga a la que se presenta en las pilas de los puentes, que ya ha sido tratada en el inciso anterior. Se la distingue, sin embargo, por existir algunas diferencias en los métodos teóricos y aun experimentales para su evaluación.

i. *Socavación aguas abajo de grandes presas*

Consiste en el descenso gradual del fondo inducido por la interrupción del transporte de sedimentos de aguas arriba, ocasionando, a su vez, por la presencia de la cortina de la presa en donde se requiere la mayor parte del sedimento que entra al vaso, lo anterior permite el incremento de la capacidad de trasporte de partículas del fondo en el tramo aguas abajo, las cuales, además, no pueden ser remplazadas.

Este tipo de socavación es generalmente por las descargas de las presas casi libres de sedimentos; esto ocasiona que las partículas que son erosionadas y transportadas de las primeras secciones cercanas a la presa no sean reemplazadas por otras que proceden de aguas arriba, ello ocurre en el primer tramo.

La erosión es mayor en las primeras secciones y disminuye paulatinamente a medida que se alejan hacia aguas abajo, hasta una sección que se puede considerar no alterada o estable, cuando el material del fondo contiene boleos tiene a acorazarse, es decir, quedan en la superficie las partículas de mayor diámetro, las cuales protegen a las que se encuentran debajo.

j. *Socavación al pie de obras de excedencia y deflectores de carga*

Se produce en secciones bajo descargas sin obras de protección y se debe a la gran energía del flujo en estas zonas, la cual se disipa generando turbulencias, esto facilita que las partículas sean suspendidas, al incrementar la erosión el tirante del agua aumenta amortiguando su caída, hasta una profundidad en que las partículas sólidas ya no pueden ser levantadas.

k. *Socavación bajo tuberías*

Se produce en tuberías sumergidas debido a la turbulencia generada por el flujo alrededor de un tubo cuando éste se encuentra al descubierto del fondo del cauce. Además bajo la tubería se produce erosión, que por lo general es mayor, aguas debajo de ella.

Para cruzar un río, las tuberías de agua, oleoductos y gasoductos deben pasar bajo el fondo del cauce. Al producirse la erosión general durante una avenida puede suceder que la tubería quede parcialmente descubierta, lo cual induce una socavación local bajo la tubería. La socavación ocurre cuando más de la mitad del diámetro de la tubería queda descubierta y el número de Froude es mayor a 0.1.

La socavación general, la transversal y la socavación en curvas pueden ser producto de la naturaleza sin la necesidad de existir en el cauce estructuras hechas por el hombre. Las otras, incluso la socavación transversal, en ocasiones son consecuencia de obras que afectan la estabilidad del cauce.

Cuadro informativo, útil en los análisis de campo y gabinete para el estudio de socavación. Puede ser que algunos datos no se encuentren, por no estar disponibles, no existir o no ser necesarios para casos particulares, esto debe decidir en ingeniero responsable y bajo experiencias

de obras anteriores. Existen modelos matemáticos que consideran la continuidad del líquido y sedimento, así como el balance de energía, por su complejidad se utilizan métodos que pueden ser adoptados fácilmente por un proyectista, estos métodos presentan ecuaciones dimensionalmente homogéneas y parámetros adimensionales, de aquí que pueden ser aplicadas utilizando un sistema de unidades coherentes.

Considerando la información disponible, los resultados, la importancia y el costo de la obra, se puede tomar la decisión acerca de la necesidad de cálculos más complejos o de la representación del fenómeno en modelos físicos a escala reducida.

1. Fallas de origen antropogénico

Uno de los aspectos que menos se toman en cuenta en el diseño de obras civiles es la respuesta de los pobladores de la zona de influencia del proyecto frente a la construcción de las mismas. Los principales problemas surgen cuando no se tienen en cuenta:

a) Las necesidades de los habitantes.

b) Las actividades económicas de la región.

c) Las costumbres de los pobladores.

La fotografía 2 ilustra de manera clara como los pobladores ocasionan el fracaso de una obra de arte. La cuneta tiene como finalidad recoger los flujos que provienen de la carretera, al ser interrumpida el flujo discurrirá por la calzada disminuyendo la vida del asfalto, y posiblemente erosionará el talud externo, comprometiendo la integridad de la vía en su conjunto.



Fotografía 2 muestra una cuneta tapada con tierra para permitir el acceso vehicular a la propiedad de un poblador en la vía

Tabla 3

Información útil en un estudio de socavación

Tipo de información	Análisis de gabinete	Reconocimiento de campo
Mapas, cartas y fotos aéreas del INEGI, de la Secretaría de marina, de SCT, etc.	Elaboración de planos topográficos, modificación del cauce.	Desarrollos de cambios de cauce desde la fecha de la elaboración de los planos y fotografías recientes.
Estructuras de cruce existentes, evaluación de su comportamiento.	Revisión del dimensionamiento de la sección del cauce. Detalles y fechas de construcción, alteración, daño, reparación, falla, etc. Profundidades de desplante de la cimentación. Niveles de avenidas. Perforaciones de prueba, muestreo y referencia.	Verificación en el sitio de: Reparaciones. Sobre elevaciones de la superestructura. Análisis de las socavaciones en el área de la estructura y del funcionamiento de las protecciones contra la erosión. Evidencia de desbordamiento o rotura de estructuras de aproximación o desviación por el flujo de agua.
Gastos y niveles de agua.	Estadísticas de gastos estacionales y máximos anuales de la estación hidrométrica más cercana. Curvas de frecuencia de la estación. Hidrográma anual y curvas de duración de flujo. Información extraoficial o no publicada de organismos, diarios,etc. Registros y pronósticos de mareas, oleajes, tormentas, marejadas, etc., en lagos y costas. Avenidas de diseño y criterios usados en proyectos de presas aguas arriba o estructuras relacionadas.	Reconocimiento minucioso del sitio en búsqueda de evidencia de niveles extraordinarios de avenidas: marcas de escombros, marcas de hielo, manchas sobre estructuras, testigo, fotografías locales, etc. Revisar si las marcas fueron afectadas por remansos, bloques de hielo, basura, o escombros (material de cualquier tipo con una distribución extendida de tamaño). Revisar la credibilidad de la información. Buscar evidencia local de oleaje, marea, viento, etc. Investigar velocidades y direcciones de corrientes máximas.
Geometría hidráulica y capacidad del cauce.	Aerofotos con apoyo topográfico y de campo. Verificar pendiente del cauce de los planos topográficos. Verificar detalles evidenciados en las fotos aéreas.	Medición de la sección transversal del cauce y llanura de inundación. Fotos del canal y aéreas adyacentes. Buscar evidencia de rutas de flujos máximos y canales de avenidas. Valorar detalles que puedan ser alterados por el flujo. Buscar secciones de control tales como rápidas, caídas, etc. Estimar rugosidad o capacidad de flujo de las llanuras de inundación. Levantamiento topo batimétrico del tramo del cauce en estudio, sin variaciones bruscas, en una longitud de diez a veinte veces su ancho, con tres a diez secciones transversales. Determinación de la pendiente hidráulica con base en la caída de la superficie libre del agua y no en la del fondo

(continuación).

Tipo de información	Análisis de gabinete	Reconocimiento de campo
Condición de hielo y escombro.	Registros de espesor de hielo, fechas de congelamiento y rompimiento de hielo, información de comportamiento y movimiento, especialmente de las obstrucciones por hielo o escombro.	Buscar evidencia local sobre daño en estructuras por condiciones extremas de hielo, troncos, rocas, material con granulometría extendida y sus efectos en las avenidas.
Datos geotécnicos.	Registros de excavación y de hincado de pilotes de estructuras existentes. Registros de perforación de pozos. Registros de pruebas de suelo.	Muestreo de material de fondo y fotografías-in situ. Buscar evidencia del máximo tamaño de roca movida por los flujos. Describir y fotografiar bancos de mate--riales. Buscar evidencia de afloramientos de roca. Hacer estudios del subsuelo hasta la máxima profundidad de socavación estimada.
Procesos del cauce y de la costa.	Comparar mapas y aerofotos de diferentes años para encontrar evidencias de cambios de cauce, movimiento de barras, erosión de las márgenes y playones.	Medir profundidades máximas de erosión en curvas, contracciones, escalones en el fondo y estructuras existentes. Búsqueda de evidencia local de cambio de cauce, erosión en las márgenes y playones, deslizamientos de tierra, etc., y sus causas. Observar indicios de degradación o ascensión general del fondo. Observar naturaleza y movimiento de las formas de fondo.
Obras de control e ingeniería.	Procedimientos de operación normal y de emergencia de estructuras hidráulicas. Propuestas de ampliación o de nuevas obras de control.	Buscar evidencia de obras no registradas, dragados, extracción de grava, rectificaciones, divergencias, etc. Examinar condiciones estructurales de obras menores de control.
Datos meteorológicos y de drenaje natural en regiones con pocos registros hidrométricos.	Área de drenaje aguas arriba del sitio en estudio. Cobertura y uso actual del suelo y futuros cambios. Pendientes, tipos de suelo y permeabilidades. Almacenamiento en lagos y vasos. Posibles obras futuras de ingeniería que afecta el escurrimiento. Intensidades y distribución de precipitación de tormentas. Nevadas, temperaturas y otros factores que influyan en el escurrimiento por deshielo. Datos de viento con efecto en las alturas de ola.	Verificar cobertura vegetal, uso, pendientes, tipos de permeabilidad del suelo. Verificar la existencia de registros de estaciones climatológicas en escuelas, aeropuertos, dependencias municipales, etc., que no estén incorporadas a la red nacional.

Las fallas de origen antropogénico pueden ser tan variadas como los pueblos que existen en

el mundo. Otros tipos de falla pueden ocurrir por el arrojo de desperdicios a los sistemas de drenaje, extracción de material de canteras de cursos de agua (lo cual debilita el lecho) en lugares cercanos a obras de cruce, etc. En esta primera sección básicamente se quiere llamar la atención a los diseñadores para incorporar en sus diseños criterios que consideren las necesidades y las costumbres de las personas. A largo plazo, aquellas costumbres nocivas de los pobladores deben desaparecer mediante la educación.

2. Fallas por flujos subsuperficiales y subterráneos

De acuerdo a lo observado en proyectos de obras viales el principal problema ocurre debido a que las evaluaciones se realizan en periodos “secos” en los cuales la napa freática ha descendido a sus niveles más bajos. El consultor excava una calicata y no advierte la presencia de la napa freática debido a que la profundidad de la excavación no alcanza el nivel de la superficie del agua. Se proyecta un terraplén en el cual la subrasante se encuentra a 0.30 m por encima del nivel del terreno en promedio. Cuando se está por construir la carretera, el contratista advierte que debido las lluvias ocurridas, el nivel de la napa freática prácticamente coincide con el nivel del terreno. En algunos casos se forman pequeñas lagunas. La base de la carretera se encontrará expuesta a saturación pues ante la ocurrencia de lluvia, el agua no se infiltrará rápidamente acelerando el proceso de encharcamiento.

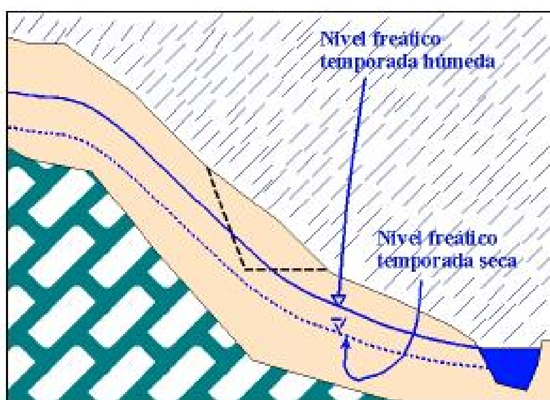


Fotografía 3. Durante un año húmedo el nivel freático subió de manera tal que se formaron charcos y pequeños bofedales en esta vía. De acuerdo al diseño original, el nivel de la subrasante estaba 30 cm. por encima del terreno natural.

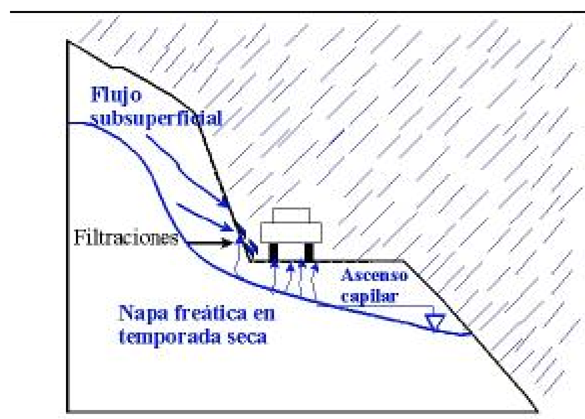


Fotografía 4. Nótese que en este sector el nivel de la napa freática casi coincide con la superficie.

Otro error que se comete cuando se diseña una carretera es asumir que las rocas no pueden conducir agua a través de sus grietas. Es necesario remarcar que la evaluación debe realizarse durante y al final de la temporada húmeda para poder visualizar los flujos que ocurren en estratos rocosos. Antes de la construcción de una carretera en una zona montañosa los flujos subterráneos y subsuperficiales discurren libremente por el suelo sin interrupciones como se ve en la Figura 4 (la zona punteada negra muestra el corte realizado para construir el camino). Cuando se construye la carretera los tramos en corte interrumpen los caminos de los flujos y estos afloran en el terraplén interior del camino, constituyéndose en una fuente continua de humedad al pavimento de la carretera como se ve en la Figura 5. Cualquier tipo de pavimento se deteriora en la presencia de agua rápidamente. En el caso del pavimento que incluye asfalto como capa superior, la presencia continua de agua acaba con el mismo rápidamente, llegándose a convertir en una masa cuya consistencia se parece a la de una arcilla húmeda.

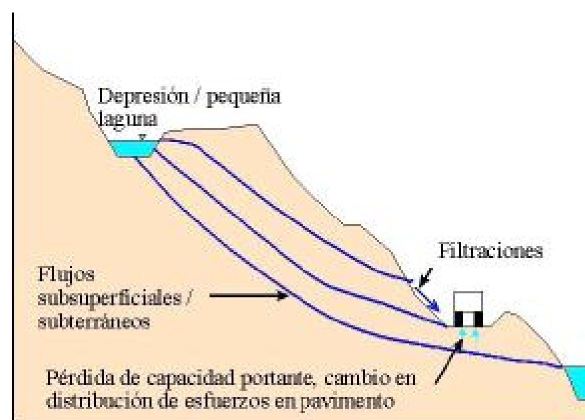


Condiciones naturales de las zonas en las que se construye una carretera. La línea sólida indica una napa freática alta (en Verano), la línea punteada indica una napa freática baja (en estación seca) (Figura 6).



Filtraciones en zonas de corte (figura 7).

Otro tipo de fenómeno que ocurre en la zona es la presencia de depresiones que forman pequeñas lagunas. Estas lagunas son fuente permanente de humedad a las zonas bajas, como se ve en la Figura 5. En algunos casos el talud se tubifica debido al paso continuo de las aguas subsuperficiales, que remueven el material fino, formando pequeños conductos (“tubos”), que se agrandan con el paso del tiempo, causando el desplome del material e interrupciones a la carretera.



Afloramiento de filtraciones por la presencia de cuerpos de agua - charcos y lagunas cuesta arriba de la carretera (figura 8).

A continuación se muestra una carretera está flanqueada por montañas en el lado izquierdo y por un río en el lado derecho. En este tramo se han hallado evidencias de flujos subsuperficiales a lo largo del lado izquierdo de la carretera, así como de tubificación. En la parte inferior del talud, se está construyendo un muro de concreto. La Figura 7 muestra el muro en el lado izquierdo de la carretera al cual aparentemente se le colocarán subdrenes.



Fotografía 5. En este lugar han ocurrido fallas en las cunetas de coronación.

En la parte superior se han construido cunetas de coronación que se están quebrando como se ve en la fotografía 5. El deterioro es sufrido aparentemente por tubificación ocasionada por la presencia de flujos subsuperficiales y la composición del suelo que está constituido por limos y arcillas, las cuales podrían ser dispersivas en naturaleza. Los flujos bajos que discurren por las cuentas de coronación provienen de los subdrenes ("lloradores") instalados en las paredes de las cunetas. La fotografía 8 muestra el subdrén drenando agua de manera continua y lentamente.



Fotografía 6. El segundo autor señala el lugar de falla de la cuneta de coronación.



Fotografía 7. Deterioro sufrido en las zanjas de coronación a pocos meses de construidas.



Fotografía 8. Esta fotografía muestra la salida de aguas subsuperficiales a través de los drenes.

3. Fallas por flujos superficiales aguas arriba y contiguas a la carretera.

Cuando se realiza el diseño de una obra de drenaje pluvial, la principal consideración es que permita conducir el caudal de diseño de manera adecuada. En el caso de una alcantarilla, por ejemplo, la carga máxima del agua aguas arriba de la carretera debe mantenerse por debajo de un nivel adecuado, de manera tal que no afecte la base de la vía y mucho menos rebase el nivel de la carretera, produciendo erosión severa en la cara externa del talud por el paso descontrolado del agua como se ve en la fotografía 9



Fotografía 9 Erosión por rebose de la alcantarilla. El agua pasó por encima del talud externo, erosionándolo.

En el caso anterior la solución es construir una alcantarilla de mayor tamaño. Es posible que una alcantarilla se obstruya por la deposición de sedimentos o por vegetación. Estos factores deben tomarse en cuenta para poder dimensionar una obra de cruce de manera correcta. El uso de un badén puede ser una solución viable en muchos casos. Si una carretera se desarrolla sobre una pendiente a media ladera con material erosionable o en relleno, se corre el riesgo que el suelo subyacente se erosione por el flujo que discurre por la carretera primero y luego por el talud externo en dirección hacia abajo. Esto ocasiona la formación de surcos primero con el consiguiente arrastre de material y posteriormente la formación de cárcavas (ver fotografía 10) y la desestabilización del talud externo.



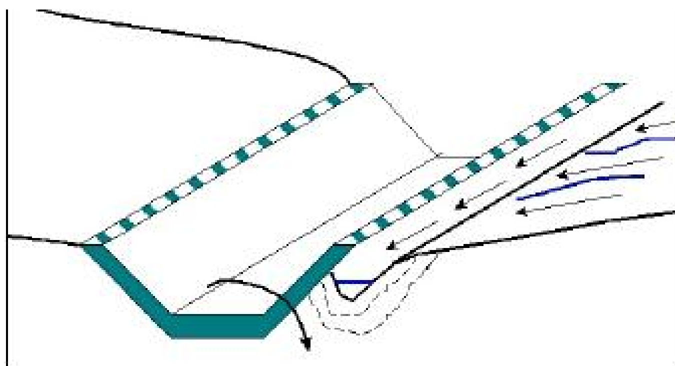
Fotografía 10. Erosión en el talud externo de la carretera por la caída de flujos desordenados. Las flechas señalan la dirección del flujo.

El problema anterior se puede solucionar con cunetas que capten el flujo, si hubiera espacio. Si no hubiera espacio para construir cunetas, se pueden construir muretes o bordillos para

conducir el flujo hacia la salida protegida de una alcantarilla.

A lo largo de las carreteras se han construyen zanjas de coronación revestidas o cunetas de coronación, las cuales tienen como función interceptar el flujo que proviene de las zonas altas y conducirlas de manera adecuada a las estructuras de cruce para entregarlas a un cauce. Las zanjas revestidas tienen la desventaja que presentan una superficie rígida que al interceptar los flujos crean un camino por el que discurre el agua, socavando el terreno aguas arriba de la obra de arte.

La socavación ocurre de manera progresiva hasta que la zanja se desestabiliza y puede quebrarse por hundimientos diferenciales. El proceso se ilustra en la figura siguiente. Las flechas en la Figura 13 ilustran la dirección del flujo que proviene del lado derecho, chocan con la estructura, que es de un material rígido y discurren por el costado, erosionando el terreno circundante. A mediano plazo se espera que las zanjas de coronación revestidas se vean comprometidas.

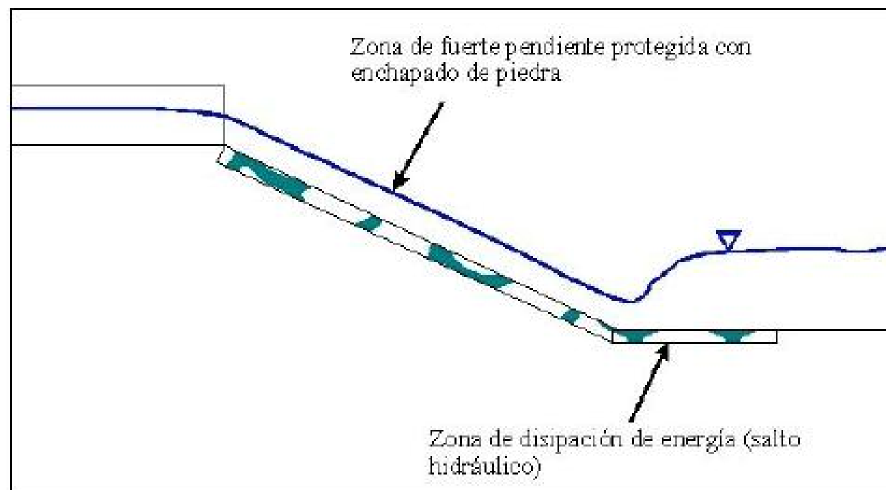


La figura que muestra los procesos erosivos inducidos en los bordes de las cunetas de coronación o zanjas de coronación revestidas (Figura 13)



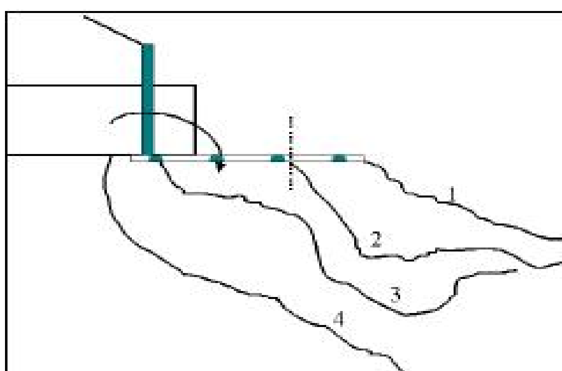
Fotografía 11. En el lado izquierdo de la alcantarilla (lado derecho de la foto) se ha creado un camino de agua que ha producido socavación concentrada.

Otros problemas ocurren a la salida de las alcantarillas debido a protección que no tiene la tiene la longitud debida, sobre todo en terreno de fuerte pendiente. Si se permite que la alcantarilla entregue su descarga a terreno natural deleznable, es posible que se socave la base y el terraplén de la obra de arte, causando el volteo de la misma. En la Figura 10 se grafica un terreno con cambio de pendiente aguas debajo de la alcantarilla. La mayor disipación de energía se produce en la zona del salto, por lo que es recomendable extender el diseño de la protección hasta aguas abajo del cambio de pendiente para evitar la socavación.



Esquema que muestra la importancia de extender la protección hasta el cambio de pendiente. (Figura 10).

Aún cuando se coloca protección como rocas embebidas en piedra es posible que ocurra erosión que socave el terreno por debajo de la protección, la cual, al no resistir los esfuerzos de tensión por no tener refuerzo se fractura, la erosión empieza un proceso regresivo como se ve en la Figura 11. Una medida para solucionar este problema puede consistir de construir una poza de disipación al final de la salida protegida si el espacio lo permite, o utilizar colchonetas de gaviones si existe una caída abrupta.



Esquema de erosión regresiva . (Figura 11.)

La erosión también ocurre en las estribaciones de las montañas favorecida por la escorrentía que se acumula en dirección aguas abajo y por la fuerte pendiente. Los flujos arrastran material que se va desprendiendo y por lo general ocurre una propagación de la erosión en dirección aguas arriba. Esto es más evidente cuesta arriba de las carreteras en las zonas semiáridas. El material se puede acumular en las obras de drenaje y producir obstrucciones que generen escorrentía que puede ocasionar daños por erosión o por un aumento en las presiones locales de los pavimentos por el efecto de cuña. Una manera de proteger las laderas de los cerros es aumentar la densidad de la superficie cubierta por vegetación. La selección debe realizarse tomando en cuenta la topografía del terreno, el clima, el tipo de suelo, etc. Mientras crece la vegetación se coloca biomantas para impedir la erosión del suelo expuesto. Otra posible solución (u otro complemento de solución) es instalar subdrenes verticales que impidan la acumulación de humedad en la superficie y el subsuelo

4. *Fallas relacionadas con cursos de agua mayores – defensas ribereñas y socavación en puentes.*

Cuando una carretera se desarrolla en relleno y el desarrollo del talud externo llega hasta un curso de agua, es necesario proteger el relleno hasta un nivel adecuado. Se recomendaría proteger por encima de la avenida de 100 años. Otra posibilidad es cuando el terreno natural naturalmente no resiste el paso del agua (se construye en una zona erosionable) y tampoco existe espacio para poder alejar la carretera del cauce. En este caso se debe proteger los taludes contra la erosión. El soporte de la carretera, natural o artificial, falla cuando el río socava el talud externo, el cual se desarrolla con una inclinación muy pronunciada. Esto ocasiona el hundimiento de la vía y la aparición de una superficie de falla. En la superficie se presenta una falla longitudinal y la superficie de la vía se inclina hacia el lado externo. Los métodos de protección ribereña deben adecuarse a la disponibilidad de materiales, el material de arrastre del río y el ancho del mismo.

Entre los métodos más usados se puede citar el enrocado, que es la colocación de capas de roca con un filtro adecuado para evitar la erosión en las riberas de los ríos; los gaviones y colchonetas de gaviones, que consisten en cestas que se llenan con bolones y cantos; bloques de suelo cemento y técnicas biotecnológicas que mezclan conceptos de la ingeniería civil y la horticultura. Los muros de concreto también se utilizan, sobre todo cuando se cimientan sobre roca, pero en general son estructuras muy rígidas que se asientan cuando la socavación excede el nivel de cimentación.

Otro tipo de falla que ocurre en carreteras es la caída de puentes o la erosión de sus accesos por acción de caudales extremos. Los puentes colapsan cuando la profundidad de socavación excede la profundidad de la cimentación, produciéndose el volteo del puente. El análisis hidráulico debe realizarse con datos de caudales máximos instantáneos anuales confiables y con una topografía adecuada. El modelo hidráulico debe realizarse con un programa de curvas de remanso, como el HEC-RAS o similar. Los métodos de cálculo de socavación más populares son los de Colorado State, HIRE y Froelich (HIRE, 1990) y están incluidos en el programa HECRAS 3.0.

Otro problema que puede ocurrir es que el puente permanezca en pie, pero los terraplenes de acceso fallen, interrumpiéndose el tránsito. Esto ha ocurrido en el Norte Peruano, donde algunos puentes quedaron aislados en medio del cauce, debido a que los terraplenes de acceso no estaban protegidos de manera adecuada como se ve en la fotografía 12.



Fotografía 12 Puente en el Norte Peruano en el que ha fallado el terraplén de acceso en la margen derecha.

I.1 Socavación general del cauce

Para el cálculo de la socavación general se recomienda utilizar el criterio de L. L. (Lichtvan-Lebediev), el cual se basa en determinar la condición de equilibrio entre la velocidad media de la corriente y la velocidad media del flujo necesaria para erosionar el material que toma el cauce. Es aplicable tanto para suelos con distribución homogénea o heterogénea. Para aplicar este método, es preciso hacer una serie de clasificaciones de los cauces de los ríos, según se indica en la tabla.4.

Tabla 4.

	Cauce	Material de fondo	Distribución de materiales en el fondo
socavación general	definido	cohesivo	homogénea
			heterogénea
		no cohesivo	homogénea
			heterogénea
	indefinido	cohesivo	homogénea
			heterogénea
		no cohesivo	homogénea
			heterogénea

Cálculo para cada condición.

I.2 Socavación general en cauces definidos.

La estimación de la magnitud de la socavación general es muy importante cuando se pretende construir o colocar obras y equipos cercanos, o bien cruzar una obra por el cauce. Lo anterior es estimar la sección de máxima erosión correspondiente a un gasto de diseño, de tal forma que al construir la obra ésta no afecte ni sea afectada seriamente

La erosión del fondo del cauce en una sección transversal cualquiera se realiza con la constante aportación de material de arrastre sólido y es provocada por la perturbación local del equilibrio entre el material que sale aguas abajo y el aportado. La determinación de la erosión se hace con el criterio que se expone en lo que sigue. Al presentarse una avenida aumenta la velocidad en el cauce; el aumento de la velocidad trae consigo un aumento de la capacidad de arrastre de la corriente, con la que se empieza a degradar el fondo. Al aumentar el gasto aumenta la socavación, incrementándose el área hidráulica y la velocidad del agua, hasta que se llega a la socavación máxima de equilibrio al ocurrir el gasto máximo; al disminuir la avenida se reduce paulatinamente el valor medio de la velocidad de la corriente y por ende la capacidad de arrastre, iniciándose la etapa de depósito.

La condición para que haya arrastre en las partículas en un punto del fondo es que la velocidad media de la corriente sobre ese punto, denominada velocidad real, v_r, sea más que la velocidad media que se requiere para que el material existente en tal punto sea arrastrado, denominada velocidad erosiva v_e para suelos sueltos, esta última no es la velocidad de inicio del movimiento generalizado del material del fondo. De tratarse de un suelo cohesivo, es aquella velocidad capaz de levantar y poner en suspensión a las partículas. Según lo explicado la erosión cesa cuando $V_e = v_r$,

La velocidad real está dada principalmente en función de las características hidráulicas del río: pendiente, rugosidad y tirante. La erosiva, en función de las características del material del fondo y del tirante de la corriente.

En la determinación de la profundidad de la erosión, tanto en cauces definidos como indefinidos, se distinguirán dos casos diferentes además de los ya enunciados, según la que la rugosidad sea o no la misma en toda la sección transversal del cruce. La presentación de las formulas se hará suponiéndose al cruce con la rugosidad uniforme y sólo al final se presentarán las modificaciones que hay que hacer para el caso en que la rugosidad varíe entre una zona de la sección transversal y otra; o bien, si la sección analizada cae bajo un puente al variar la rugosidad de un claro del puente a otro.

I.3 Análisis de la socavación general para los suelos cohesivos en cauces definidos con rugosidad uniforme.

El problema consiste en calcular la erosión máxima general que se puede presentar en una sección al pasar una avenida con un gasto de diseño Q_d , el cual tendrá una cierta frecuencia de retorno. Para los cálculos subsecuentes se requiere conocer el gasto Q_d y la elevación que alcanza la superficie del líquido para ese gasto en la sección en estudio.

En esta teoría, la magnitud de la erosión en suelos limosos plásticos y arcillosos depende principalmente del peso volumétrico del suelo seco. En este caso, el valor de la velocidad erosiva que es la velocidad media que se requiere para degradar el fondo, esta dado en la expresión:

$$v_e = 0.60 \ \gamma_d^{1.18} \beta \ H_s^{x} \quad ; \ \text{m/seg.} \qquad (I.3.1)$$

en donde:

γ_d = peso volumétrico del material seco que se encuentra a la profundidad H_s, en ton/m^3.

β = un coeficiente que depende de la frecuencia con que se repita la avenida que se estudia y cuyo valor esta consignado en la tabla 5

H_s = tirante considerando, a cuya profundidad se desea conocer qué valor de V_e se requiere para arrastrar y levantar al material en m.

x = es un exponente variable que está en función del peso volumétrico γ_d del material seco en ton/m^3, el cual se encuentra consignado en la tabla 6. En ese mismo cuadro se indica el valor de la expresión 1/1 + x que será necesaria más adelante, así como así como el valor del exponente x cuando el material del fondo no es cohesivo. En este último caso x es función del diámetro medio de los granos.

La variación de la profundidad media real de la corriente V_r, , en función de la profundidad y para cada punto de la sección puede ser obtenida analizando una franja vertical de la sección trasversal, como la muestra en la fig .(12) La hipótesis que se formula para realizar el cálculo es que el gasto en cada franja permanece constante mientras dura el proceso erosivo.

Tómese la franja de espesor ΔB, y en forma hipotética considérese que el fondo se encuentra en su nivel inicial antes de que se produzca la erosión. El gasto que pasa por esa sección se puede expresar según Manning por:

$$Q = V \Delta A = 1/n\ (s^{1/2} H_o^{5/3} \Delta B).$$

Pues en este caso, por ser ΔB pequeño, el radio hidráulico es igual al tirante.

En la expresión anterior:

s = pendiente hidráulica.

H_o = profundidad antes de la erosión.

n = coeficiente de rugosidad de Manning.

Como se ha considerado una rugosidad constante en toda la sección el valor de 1/n ($s^{1/2}$) es constante para cualquier punto de la sección y se denominará a. Entonces:

$$Q = a\ H_o^{5/3} \Delta B. \qquad (I.3.2)$$

El valor de a puede también ser expresado en forma general como una función del tirante medio H_m de toda la sección transversal antes de la erosión y del gasto de diseño Q_d ya que:

$$Q_d = 1/n\ (s^{1/2} H_m^{5/3} B_e).$$

donde:

B_e = ancho efectivo de la superficie del líquido en la sección transversal; es decir, del ancho de las pilas cuando el ángulo de incidencia de la corriente con respecto al eje de la pila es 0°. Más adelante se indicará como encontrar el valor de B_e que debe ser tomado en cuenta, cuando la corriente forma un ángulo cualquiera con el eje de las pilas. Las demás letras tienen los sentidos ya indicados.

En las expresiones anteriores H_m es tirante medio de la sección, el cual se obtiene dividiendo el área hidráulica efectiva entre el ancho de B_e.

Cuando la sección en estudio corresponde al cruce de un puente la corriente del agua forma vórtices cerca de las pilas y estribos del mismo, por lo que se hace necesario afectar el valor de Q_d de un coeficiente μ llamado contracción, el cual se encuentra tabulado en la tabla 5

$$Q_d = \mu/n(s^{1/2} H_m^{5/3} B_e).$$

$$Q_d = a\, \mu H_m^{5/3} B_e. \qquad \text{(I.3.3)}$$

de la ec. 2.3.3 puede despejarse:

$$a = Q_d /(H_m^{5/3} B_e \mu). \qquad \text{(I.3.4)}$$

Ahora bien, en la franja en estudio, al incrementar H_o , y alcanzar un valor cualquiera H_s, la velocidad disminuye a un valor v_r, En función de la velocidad y el tirante. ΔQ en la franja ΔB esta expresado por:

$$\Delta Q = v_r, H_s \Delta B.$$

Igualando esta última expresión con la (I.3.2) se tiene:

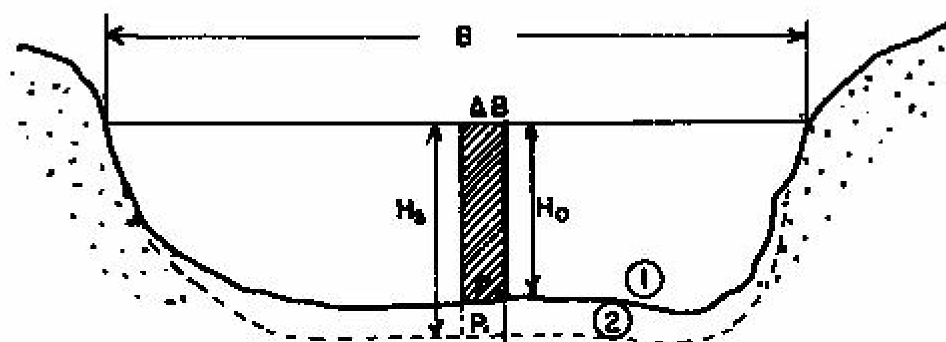
$$v_r, H_s \Delta B. = a\, H_o^{5/3} \Delta B.$$

de donde la velocidad real de la corriente vale:

$$v_r, = a\, H_o^{5/3} / H_s. \qquad \text{(I.3.5)}$$

La erosión se detendrá cuando a una profundidad cualquiera alcanzada, el valor de v_r, velocidad de la corriente capaz de producir arrastre y V_e= velocidad que se necesita para que el fondo se degrade, lleguen a ser iguales.

$V_e = v_r$, es la condición de equilibrio.



(1) Perfil antes de la erosión.
(2) Perfil de equilibrio tras la erosión.

Variación de la velocidad media real de la corriente con la profundidad (Fig. 12)

Tabla 5

probabilidad anual (en %) de que se presente el gasto de diseño	coeficiente β
100	0.77
50	0.82
20	0.86
10	0.9
5	0.94
2	0.97
1	1.00
0.3	1.03
0.2	1.05
0.1	1.07

Tabla 6

valores de x y 1/1 + x para suelos cohesivos y no cohesivos											
suelos cohesivos						suelos no cohesivos					
$\gamma_{d\ (mm)}$	x	1/(1+x)	$\gamma_{d\ (mm)}$	x	1/(1+x)	d (mm)	x	1/(1+x)	d (mm)	x	1/(1+x)
0.80	0.52	0.66	1.20	0.39	0.72	0.05	0.43	0.70	40.00	0.30	0.77
0.83	0.51	0.66	1.20	0.38	0.72	0.15	0.42	0.70	60.00	0.29	0.78
0.86	0.50	0.67	1.28	0.37	0.73	0.50	0.41	0.71	90.00	0.28	0.78
0.88	0.49	0.67	1.34	0.36	0.74	1.00	0.40	0.71	140.00	0.27	0.79
0.90	0.48	0.67	1.40	0.35	0.74	1.50	0.39	0.72	190.00	0.26	0.79
0.93	0.47	0.68	1.46	0.34	0.75	2.50	0.38	0.72	250.00	0.25	0.80
0.96	0.46	0.68	1.52	0.33	0.75	4.00	0.37	0.73	310.00	0.24	0.81
0.98	0.45	0.69	1.58	0.32	0.76	6.00	0.36	0.74	370.00	0.23	0.81
1.00	0.44	0.69	1.64	0.31	0.76	8.00	0.35	0.74	450.00	0.22	0.83
1.04	0.43	0.70	1.71	0.30	0.77	10.00	0.34	0.75	570.00	0.21	0.83
1.08	0.42	0.70	1.80	0.29	0.78	15.00	0.33	0.75	750.00	0.20	0.83
1.12	0.41	0.71	1.89	0.28	0.78	20.00	0.32	0.76	1000.00	0.19	0.84
1.16	0.40	0.71	2.00	0.27	0.79	25.00	0.31	0.76			

Tabla 7

Velocidad media en la sección, en m/seg.	Longitud libre entre dos pilas (claro), en metros.												
	10	13	16	18	21	25	30	42	52	63	106	124	200
menores de 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.00	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.50	0.94	0.96	0.97	0.97	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00
2.00	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00
2.50	0.90	0.93	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00
3.00	0.89	0.91	0.93	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99
3.50	0.87	0.90	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99
4.00 ó mayor	0.85	0.89	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99

I.4 Análisis de la socavación general para suelos no cohesivos, en cauces definidos con rugosidad uniforme.

En el estudio de la profundidad de la erosión en suelos formados por granos gruesos (arenas, gravas finas, etc.), $V_{r,}$ tiene el mismo valor que en el caso anterior:

$$V_{r,} = a\ H_o^{5/3} / H_s.$$

En cambio V_e está expresada en la teoría que se analiza por:

$$V_e = 0.68\ \beta\ d_m^{0.28} H_s^x \qquad \text{(m/seg.)} \qquad (I.4.6)$$

en donde:

H_s = tirante para el que se desea conocer V_e , en metros.
x = exponente variable que depende del diámetro del material y que se encuentra en la tabla 4.
d_m = es el diámetro medio en mm de los granos del fondo obtenidos según la expresión.

$$d_m = 0.01 \sum di\ pi \qquad (I.4.7)$$

en la cual:

di = diámetro medio, en mm, de una fracción en la curva granulométrica de la muestra total que se analiza.
pi = peso como porcentaje de esa misma porción, comparada respecto al peso total de la muestra. Las fracciones escogidas no deben necesariamente ser iguales entre sí.

La condición de equilibrio para la socavación será también:

$$V_r = v_{e,}$$

I.5 Cálculo de la profundidad de la socavación en suelos homogéneos.

En secciones homogéneas puede calcularse fácilmente la profundidad esperada de socavación dentro de la Teoría de Lischtvan-Lebediev a partir del análisis hecho en los dos párrafos anteriores.

Al final del párrafo I.3 se anotó que la condición de equilibrio se presenta cuando la velocidad de arrastre de la corriente V_r es igual a la velocidad que se necesita tener para arrastrar el material, V_e .

Dentro de los suelos homogéneos únicamente se distinguen dos condiciones diferentes según sea el material cohesivo o no.

a) Suelos cohesivos. La condición de equilibrio es $V_e = v_{r,}$ en que V_e está dada por la formula (I.3.1) y $v_{r,}$ por la (I.3.5).

$$0.60\ \gamma_d^{1.18}\ \beta\ H_s^x = a\ H_o^{5/3} / H_s.$$

de donde:

$$H_s^{(1+x)} = a\ H_o^{5/3} / (0.60\ \gamma_d^{1.18}\ \beta)$$

y, por lo tanto

$$H_s = \left((a\ H_o^{5/3}) / (0.60\ \gamma_d^{1.18}\ \beta) \right)^{1/(1+x)} \qquad (I.5.8)$$

que es el tirante total que se produce; al restarle el tirante inicial, H_o, proporciona la socavación esperada.

b) Suelos formados por materiales no cohesivos. En este caso V_e está dada por la formula (I.4.6).

Aplicando la condición de equilibrio:

$$V_r = v_e,$$

se tiene:

$$0.68\ \beta\ d_m^{0.28} H^x{}_s = a\ H_o^{5/3} / H_s.$$

de donde:

$$H_s = \left((a\ H_o^{5/3}) / (0.68\ \gamma_d^{0.28} \beta) \right)^{1/(1+x)} \qquad (I.5.9)$$

de donde puede deducirse la profundidad de socavación.

Conocido el perfil transversal de la sección bajo el puente antes del paso de la avenida, se escogen en él algunos puntos en cuyas verticales se desea conocer a cuánto alcanza la profundidad erosionada. Uniendo éstos se tiene el perfil de socavación.

Se ha dicho que la hipótesis principal de esta teoría es que el gasto en cada franja permanece constante durante todo el proceso. Como el gasto en la orilla es cero, este método no permite estimar ninguna erosión lateral en las márgenes.

I.6 Cálculo de la profundidad de la socavación en suelos no homogéneos.

Por suelos no homogéneos se designan aquellos que se encuentran en estratos o capas diferentes.

En este caso, cualquiera que sea la estratificación que se tenga, la profundidad de equilibrio, arriba de la cual los granos son arrastrados físicamente por el agua, se puede obtener analíticamente a base de tanteos.

Escogido un punto Pi para el cual se desea calcular la posible socavación y conocida la estratigrafía bajo la sección, se procede por estratos a aplicar las fórmulas I.5.8 ó I.5.9 según sea el material de que estén formados. El cálculo se inicia para el manto superior y se continúa hacia capas más profundas. En el primer estrato en donde se cumpla que la profundidad H_s calculada cae dentro de él, esa "H_s" es la buscada y se suspenden los tanteos. Esto mismo se repite para varios puntos de la sección, que al unirlos darán el perfil teórico del fondo una vez que se ha producido la socavación.

I.7 Socavación general en cauces indefinidos.

En el caso de un río carente de un cauce bien formado, por ejemplo aquellos en que se tienen varias corrientes pequeñas que se entrecruzan y en donde esas corrientes cambian de posición con relativa facilidad, se tiene una cavidad erosiva más reducida. En estos ríos se cumplen por definición las siguientes condiciones:

$$Q_p / Q_a - \leq 0.25 \qquad (I.7.10)$$

en que:

Q_p = gasto que pasa por el mayor cauce formado en estiaje que se denomina cauce principal.
Q_a = gasto suma de los que pasan por los otros cauces.

Otra condición es que

$$B_o / B_r = 0.80 \qquad (I.7.11)$$

Donde:

B_o = anchura del cauce para un nivel normal del agua.
B_r = ancho total del nivel de agua máxima comprendido entre los bordos del cauce de avenidas.

En los cauces indefinidos la socavación se puede calcular dentro de la teoría de L. L. Lischtvan-Lebediev con una secuela igual a la que se usó en los definidos, sin embargo, la velocidad real, V_r , se compara ahora no con $V_{e},$ sino con una velocidad que los autores llaman no erosionante, $V_{C},$. La velocidad $V_{C},$. depende de la naturaleza del material del fondo y del tirante de la corriente.

En general

$$V_c = V_{c1} H_s^{0.2} \qquad (I.7.12)$$

donde:

V_c = velocidad no erosionante para el tirante H_s.
H_s = tirante, en m, existente en el punto de estudio en el momento para el que se calcula la socavación.
V_{c1}= velocidad no erosionante correspondiente a un tirante de un metro.

Con estas ideas, la profundidad de la socavación puede calcularse para suelos cohesivos y no cohesivos con tal de conocer V_{c1}; el valor de ésta puede obtenerse de las tablas 8 y 9 para suelos cohesivos y no cohesivos, respectivamente.

TABLA 8

Valores de V_{c1} para suelos cohesivos, en m/seg.
H = 1 m.

tipo de suelo	$1.2 \leq \gamma_d < 1.66$ ton/m^3	$1.66 \leq \gamma_d \leq 2.04$ ton/m^3	$2.04 < \gamma_d \leq 2.14$ ton/m^3
arcillas francas	0.85	1.20	1.70
suelos arcillosos y limos plásticos	0.80	1.20	1.70
arcillas margosas	0.70	1.00	1.30

Tabla 9

Valores de V_{c1} para suelos no cohesivos, en m/seg.
H = 1 m

tipo de suelos	D_m (mm)	Valores de V_{c1}, (m/seg).
limos no plásticos	0.005---- 0.05	0.20 -- 0.30
arena fina	0.05-----0.25	0.30 -- 0.45
arena media	0.25-----1.0	0.45 -- 0.60
arena gruesa	1.0------5.0	0.60 -- 0.85
grava fina y medias	5.0-----25.0	0.85 -- 1.45
grava gruesa	25.0-----75.0	1.45 -- 2.40
fragmentos chicos	75.0----200.0	2.40 -- 3.80
fragmentos medianos	200.0----400.0	3.80 -- 4.75

II. TEORÍA DE LISCHTVAN-LEBEDIEV.

Como se ha notado, la teoría expuesta por Lischtvan-Lebediev, requiere para su aplicación de datos que son relativamente fáciles de obtener en la naturaleza, permite determinar, además del valor de la socavación general en cualquier tramo de un río, el correspondiente a la socavación debida a la contracción en secciones donde se ha reducido el área hidráulica.

a) El gasto Q_d de diseño escogido con una frecuencia determinada y que puede ser obtenido mediante algún método estadístico
b) El perfil de la sección durante el estiaje, que es cuando más cómodo resulta obtenerlo.
c) Características del material del fondo (γ_d ó d_m), así como su distribución en el subsuelo, para lo cual se requiere hacer sondeos.

La hipótesis de la partida y fundamental es que el gasto permanece constante durante todo el proceso erosivo en cada franja escogida de la sección. Como el gasto de las orillas es igual a

cero, después de la erosión deberá permanecer así, por lo que se excluye la posibilidad de cualquier corrimiento lateral. En la mayoría de las ocasiones esto se cumple excepto en la parte exterior de las curvas. Al tratarse del cálculo bajo de un puente, los estribos impiden cualquier avance lateral.

Al considerar la hipótesis de partida de la conservación del gasto, se puede presentar un inconveniente cuando en el fondo del cauce existe una zona con un material más resistente a la erosión que en el resto de la sección. Se presentara en la zona menos resistente un descenso del fondo más rápido. Esto hará que después de un cierto tiempo sea mayor el gasto sobre esa zona y disminuya sobre la zona con material más resistente. En el caso del material menos resistente a la erosión, las profundidades que se alcanzan serán más pequeñas que las dadas por la teoría.

La teoría no toma en cuenta el tiempo necesario para que cada material pueda ser erosionado.

Las erosiones teóricas calculadas se pueden presentar con facilidad si el material es granular y no cohesivo; sin embargo, para materiales cohesivos se requiere un cierto tiempo para que la corriente realice todo su trabajo, tiempo que puede ser mayor que el de duración de la avenida. Debido a esto, se pueden presentar erosiones menores que las calculadas en esos materiales, aunque la corriente haya tenido en un momento dado, una capacidad de erosión mayor.

No se puede precisar el grado de exactitud de todas las fórmulas y criterios propuestos, ya que han sido aplicados en contadas casos en el medio local y sobre todo no se ha realizado ninguna observación en algún puente recién construido, que se tenga registrado.

Para realizar esas observaciones, la formula más sencilla podría consistir en una serie de perforaciones efectuadas durante el estiaje, que después se rellenarían de un material distinto al del suelo, polvo de ladrillo por ejemplo. En la siguiente época de secas se harían unos pozos en el sitio de las perforaciones hasta alcanzar la profundidad que indicaría el nivel hasta donde el fondo descendió durante la máxima avenida anterior. Para localizar fácilmente esos pozos se podría hincar un tubo o varilla metálica de unos 2 cm. de diámetro en toda la profundidad del pozo, dejándola sobresalir 1 ó 2 metros del nivel actual del fondo. Estos pozos permitirían realizar observaciones en años posteriores, siempre y cuando los nuevos gastos máximos sean mayores que todos los pasados desde que se construyo el pozo. El método anterior sólo es uno entre una variedad muy grande que a cada ingeniero se le pueda ocurrir.

Cuando para determinar el gasto de diseño se recurra a un método del tipo de *sección y pendiente*, surge el inconveniente de que en rigor debería de entrarse con el gasto máximo correspondiente al área hidráulica socavada, la cual no se conoce a priori. En este caso puede procederse por tanteos como sigue:

Se supone un tirante y un área incrementada por socavación y con ellos se calcula un gasto máximo; con este gasto se aplica el método de Lebediev y se verifica si el H supuesto fue el correcto o no.

II.1 Criterios para la socavación local en las pilas de los puentes.

Cuando un puente cruza un río en una zona donde no es factible alcanzar un manto rocoso en el que apoyar las pilas y estribos, el principal problema que se presenta tanto en proyectos como en mantenimiento, es el conocimiento de las erosiones locales que sufre el fondo del cauce, que pueden ser de tal magnitud que lleguen a alcanzar la base de las pilas y provocar la falla total de la estructura.

El primero es el propuesto por Laursen, Toch y su escuela, donde, en primer termino la socavación depende fundamentalmente del tirante y ancho de la pila y en segundo termino de la forma de ésta, si bien este parámetro no es significativo cuando la corriente y el tamaño de los granos del fondo no son factores que sean tomados en cuenta para determinar la profundidad de la socavación. El segundo criterio que se debe a Yaroslavtziev es el resultado de mediciones hechas en varios puentes de la Unión Soviética y ha sido corroborado por otros investigadores, para Yaroslavtziev, la socavación depende de la velocidad media de la corriente en primer termino y tanto el tamaño de los granos del fondo, como la geometría de la pila, aun que en caso de ataque oblicuo de la corriente, son parámetros significativos en la valuación de la profundidad de la socavación.

Estos estudios son avalados por los Ingenieros mexicanos, Maza-Sánchez, ya que se ha desarrollado y es aplicable en problemas del país por existir la información necesaria, basados en modelos y experiencias realizadas en la Facultad de Ingeniería (México),

Mediante las graficas 3, 4, y 5 es posible determinar la socavación local como una función de la relación entre el ancho de la pila y la profundidad del agua y el cuadro del número de Froude. Los parámetros mostrados en las graficas tienen el siguiente significado.

H = tirante de la corriente frente a la pila en una zona no afectada por la erosión local, obtenido después de calcular la socavación general, transversal o en curva. Es decir, las erosiones locales se calculan a partir de las condiciones de la corriente, una vez que se han producido las erosiones que afectan al fondo del cauce.

b_1 = proyección de la pila de un plano perpendicular a la corriente. Cuando el flujo y el eje longitudinal de la pila están alineados, b_1 es igual al ancho de la pila b.

ϕ= ángulo entre la dirección del flujo y el eje longitudinal de las pilas.

F = número de Froude del escurrimiento aguas arriba de la pila.

V = velocidad media del flujo inmediatamente aguas arriba de las pilas (no se considera la presencia de las pilas), después de que el fondo ha sido erosionado, sin tomar en cuenta la erosión local.

S_o = erosión local media desde el fondo no afectado por esta erosión.

S_t = erosión local media desde la superficie libre del agua.

f_c = coeficiente por el que hay que afectar al número de Froude, F, cuando ϕ K 0° y F>0.25

II.2 Método de Laursen y Toch.

Basado principalmente en las experiencias realizadas por esos investigadores en el Instituto de Investigación Hidráulica de Iowa, fue confirmado con mediciones realizadas en un puente sobre el río Skunk por P.G. Hubbard del mismo laboratorio.

Los autores de estos trabajos distinguen dos casos generales; uno cuando la corriente incide paralelamente al eje de las pilas y otro cuando forma un cierto ángulo con el mismo.

Cuando la mayor dimensión transversal de la pila está alineada con el flujo, la socavación puede expresarse por la figura 13

$$S_o = K_1 K_2 b \qquad \text{(II.2.13)}$$

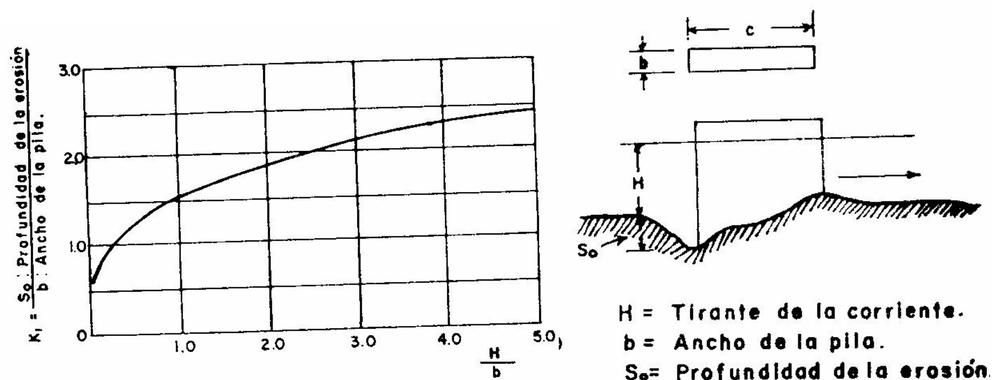
donde:

S_o = profundidad de la socavación, a partir del fondo

K_1 = coeficiente que depende de la relación tirante entre ancho de la pila y que se encuentra en la grafica 1 de la fig. 13

K_2 = coeficiente que depende de la forma de la nariz de la pila y que se encuentra en la tabla 10

b = ancho de la pila.



Grafica 1 relación entre la erosión relativa y la profundidad relativa. (figura 13)

Como se puede observar, para Laursen y Toch la socavación depende únicamente del tirante, ancho de la pila y de la forma de ésta, sin tomar en cuenta la velocidad, ni el diámetro del

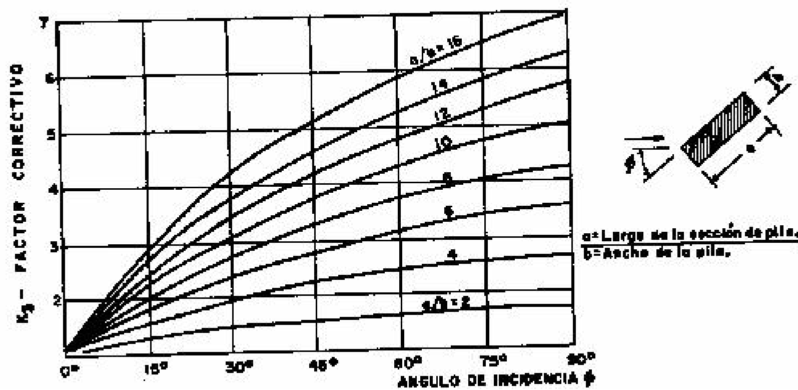
material del fondo. Este se considera únicamente arenoso, por lo que el método no es aplicable si existen boleos en el cauce.

En el caso de incidir oblicuamente la corriente y formar un ángulo ϕ con el eje de la pila, la socavación puede determinarse con la expresión:

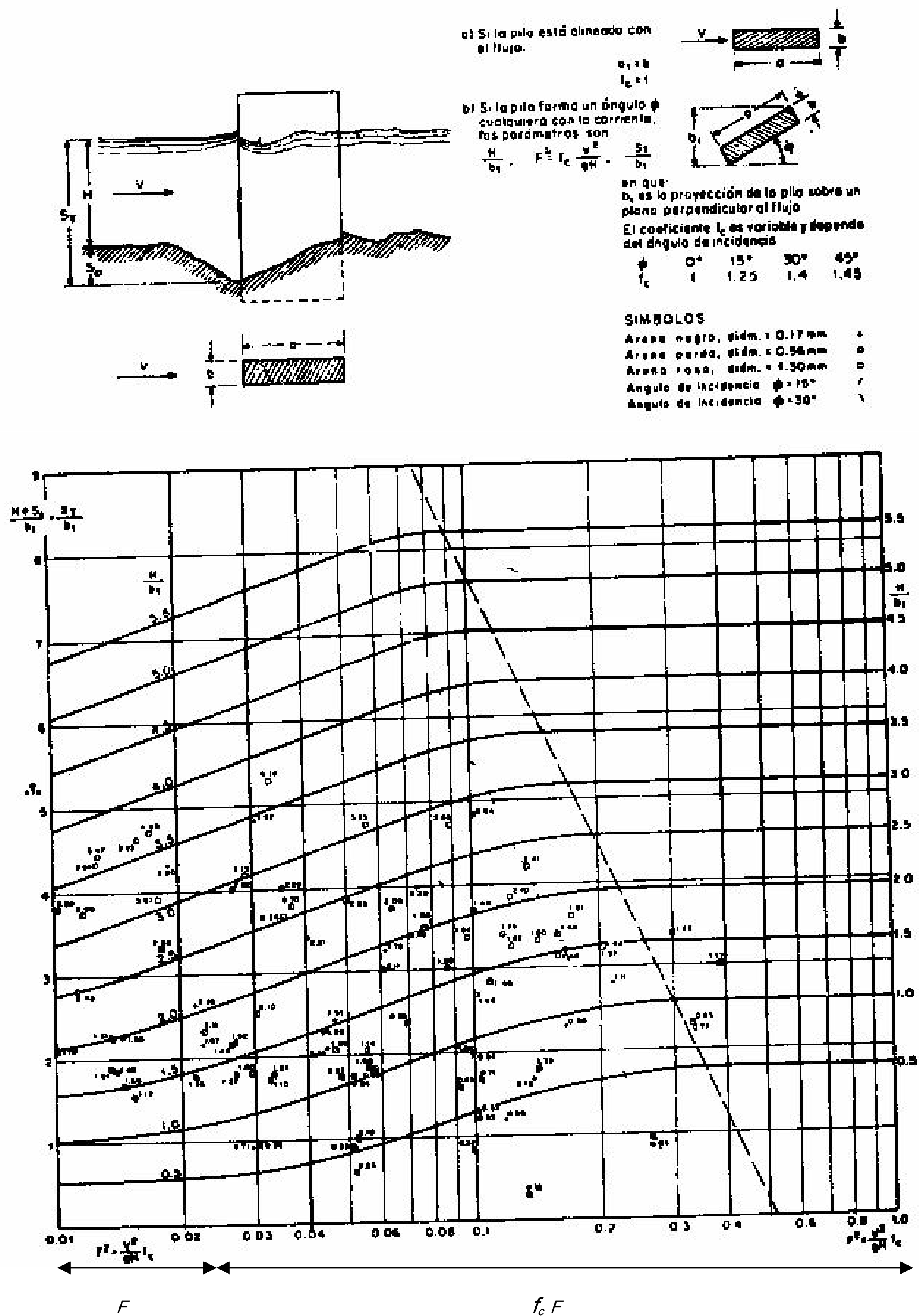
$$S_o = K_1 K_3 b \qquad \text{(II.2.14)}$$

en donde:

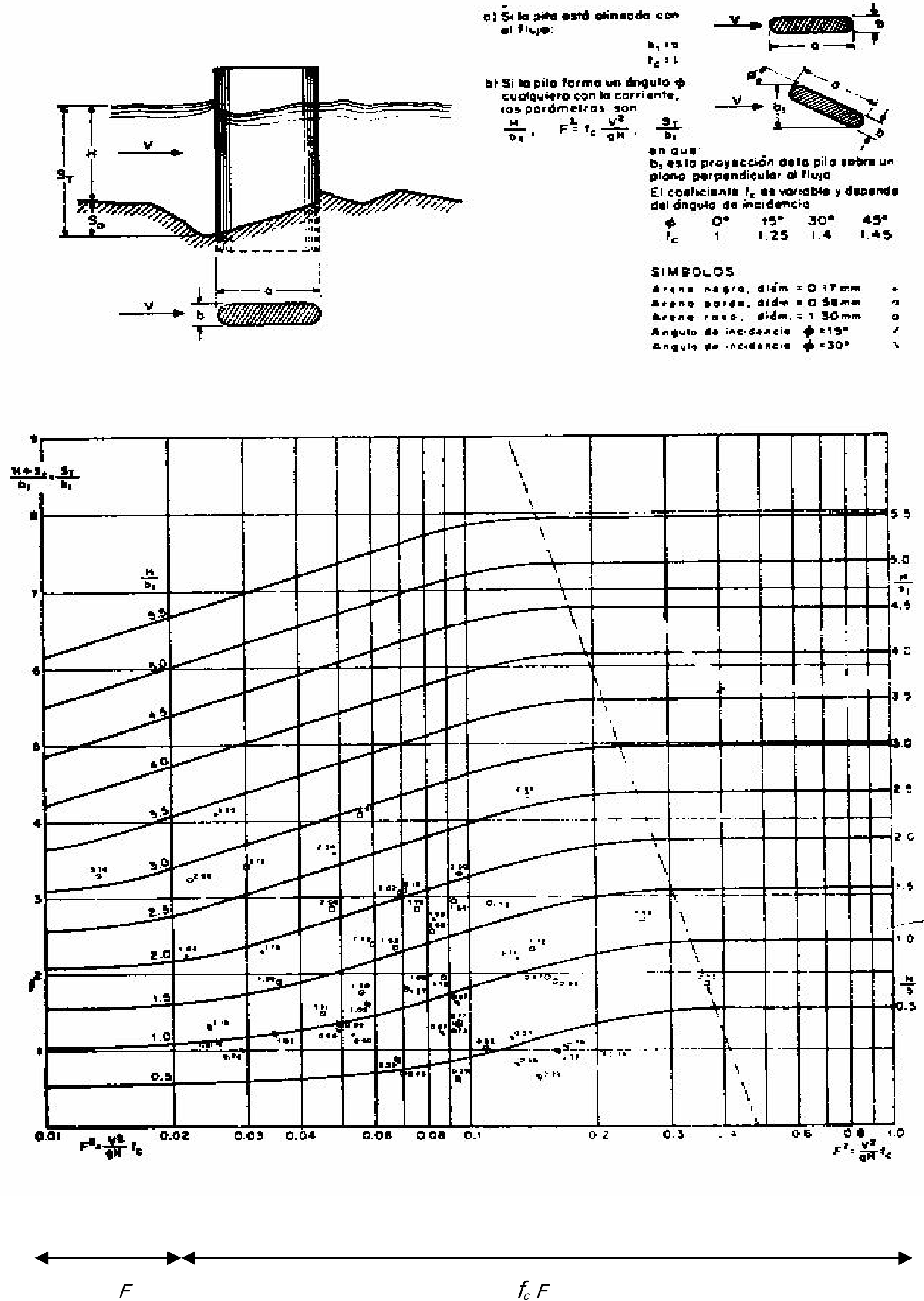
K_3 = coeficiente que depende del ángulo ϕ y de la relación a/b, el cual se determina con la ayuda de la fig. 14 grafica 2



Grafica 2 Coeficiente de corrección cuando existe un ángulo de incidencia entre el eje de la pila y la corriente. (Figura 14)

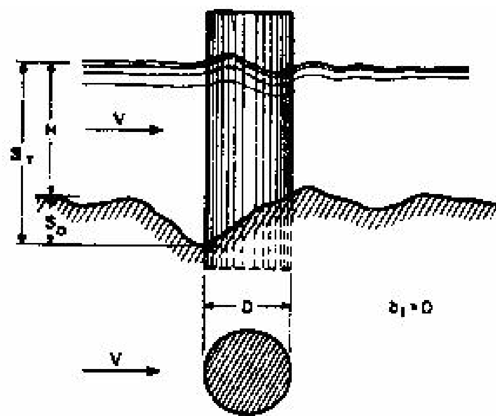


Grafica 3 para determinar la socavación alrededor de pilas rectangulares. (Figura 15)

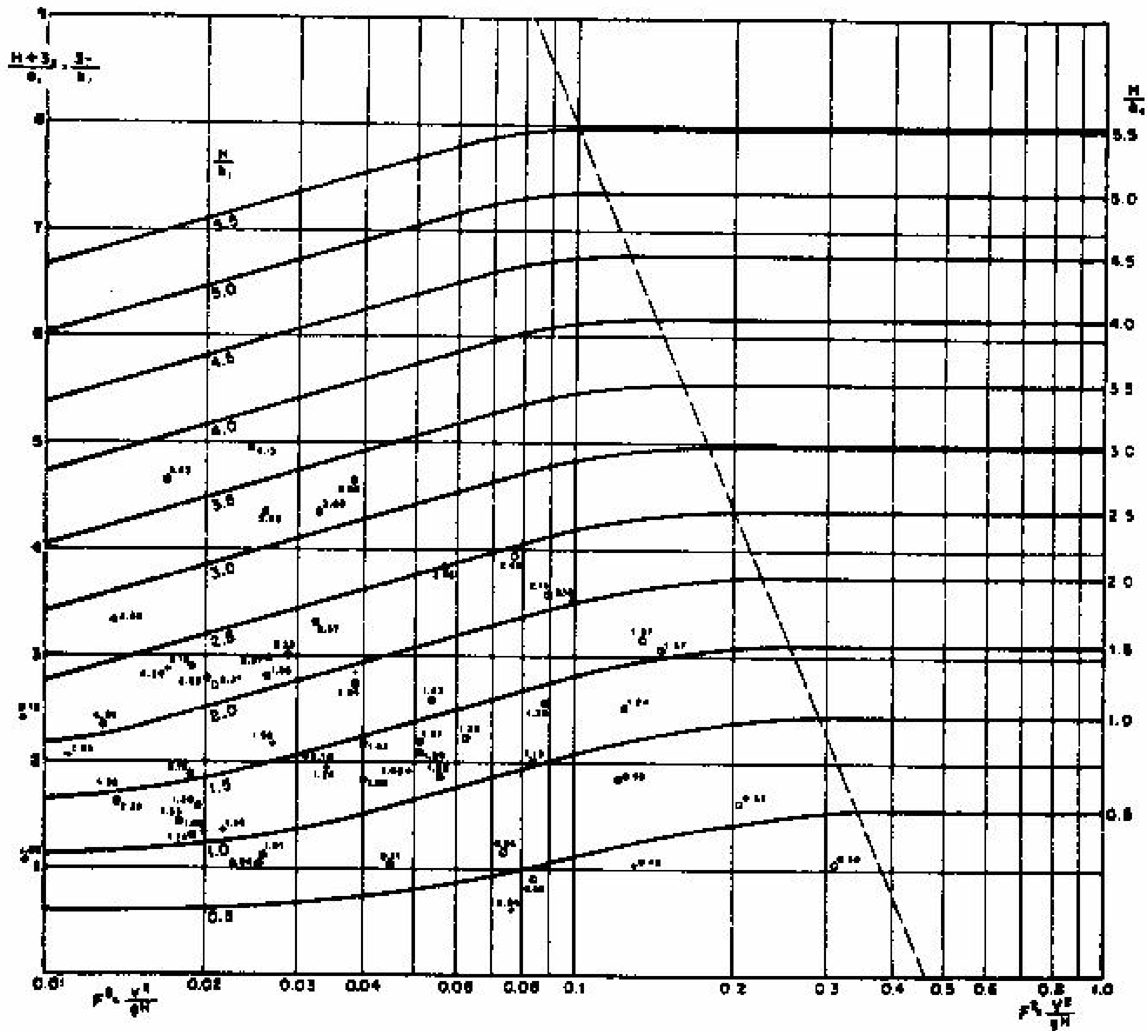


F f_c F

Gráfica 4 para determinar la socavación alrededor de pilas rectangulares con frentes redondeados. (Figura 16)



SIMBOLOS
Arena negra, diám = 0.17mm
Arena parda, diám. = 0.58mm
Arena rosa, diám. = 1.30mm



Gráfica 5 para determinar la socavación alrededor de pilas circulares. (Figura 17)

La erosión local que se obtiene con ayuda de las gráficas 3, 4, y 5 es la máxima que se puede presentarse. Este método es útil solamente para fondos compuestos de arena y grava. Las

gráficas han sido desarrolladas para pilas con secciones de formas rectangulares, rectangulares con frentes redondeados y circulares. Son también útiles cuando el eje de las pilas forma un cierto ángulo con la dirección del flujo. Para pilas esviajadas, el número de Froude debe corregirse por el factor f_c si éste es mayor que 0.06; el valor de f_c se indica en las gráficas 3, 4 y 5 como una función de ϕ(ángulo que forman los ejes de las pilas con la dirección del flujo).

Para aplicar el método no es necesario conocer el mecanismo de socavación desarrollado, sin embargo se dará una breve descripción con la finalidad de tener una idea clara de la información y el desarrollo de la socavación al pie de las pilas de un puente. Cabe señalar que estas observaciones fueron realizadas en un canal de laboratorio de hidráulica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Los parámetros que influyen en la profundidad de socavación al pie de una pila de puente se pueden agrupar, de acuerdo con su naturaleza, en cinco diferentes clases:

a) parámetros hidráulicos

1. velocidad media del flujo.
2. profundidad del flujo en la cara de la pila.
3. distribución de velocidades.
4. dirección del flujo con respecto a los ejes de las pilas.

b) parámetros del material del fondo.

5. diámetro del material.
6. curva granulométrica.
7. forma del grano.
8. grado de cohesión.
9. peso especifico sumergido.
10. espesor de las capas del subsuelo.

c) parámetros geométricos de las pilas.

11 ancho de la pila.
12 relación entre la longitud y el ancho de la pila.
13 sección transversal de las pilas.

d) características que dependen de la localización del puente.

14. contracción de la sección del puente.
15. radio de curvatura del tramo del río.
16. obras de control de flujo, ya sea aguas arriba o aguas abajo.

e) parámetros de tiempo.

17. duración del pico de la avenida.
18. tiempo requerido para remover el material y alcanzar una condición estable.

Debido a la forma en que se realizaron los estudios, se despreciaron los factores 10, 14, 16, 17 y 18; Así también se desarrollaron experimentos con tres tipos de material granular, cuatro tipos de pilas y diferentes ángulos de incidencia; en cada caso, para un determinado material, tipo de pila y su localización, sólo se varió la profundidad y la velocidad del flujo.

TABLA 10
Coeficiente de corrección que depende de la forma de la pila.
Es solo aplicable a las pilas orientadas según la corriente.

FORMA DE LA NARIZ		COEFICIENTE K_2 DE SCHNEIBLE
RECTANGULAR a/b = 4		1.00
SEMICIRCULAR		0.90
ELIPTICA	p/r = 2/1	0.81
	p/r = 3/1	0.75
LENTICULAR	p/r = 2/1	0.81
	p/r = 3/1	0.69

FORMA DE LA NARIZ	SEGUN TISON
BISELADA a/b = 4	0.78
PERFIL HIDRODINAMICO a/b = 4	0.75

II.3 Método de Yaroslavtziev.

Este investigador distingue dos casos, uno cuando el fondo del cauce está formado por materiales no cohesivos y otro cuando está formado por materiales cohesivos.

II.4 Método para suelos granulares sin cohesión

La expresión propuesta por Yaroslavtziev fue obtenida al parecer de la observación directa en varios puentes de la Unión Soviética y es

$$S_o = K_f K_v (e + K_H)(v^2/g) - 30d \qquad \text{(II.4.15)}$$

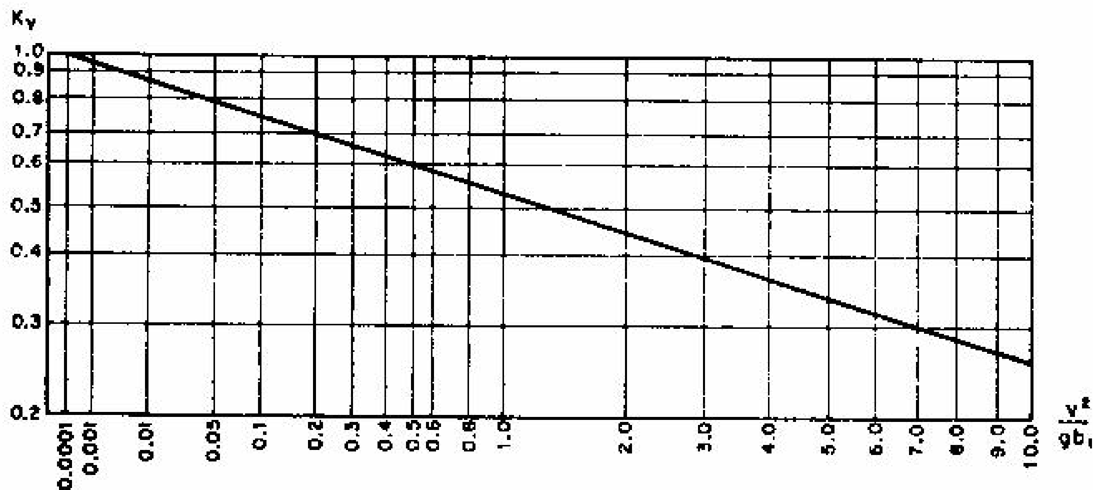
en que:

S_o = profundidad de socavación, en m.
K_f = coeficiente que depende, en general, de la forma de la nariz de la pila y del ángulo de incidencia entre la corriente y el eje de la misma. Se encuentra en la fig. 20 (a, b y c).
K_v = coeficiente definido por la expresión:
$\text{Log}\ K_v = -0.28\ \sqrt[3]{v^2 / g b_1}$ el cual puede encontrarse también en la gráfica 6 fig. 18
v = velocidad media de la corriente aguas arriba de la pila, después de producirse la erosión general, en m/s.
g = 9.81 m/s²
b_1 = proyección de un plano perpendicular a la corriente, de la sección de la pila. Cuando el ángulo de incidencia vale 0°, b_1 es igual al ancho b de la pila.
e = coeficiente de corrección, cuyo valor depende del sitio en donde están colocadas las pilas; vale 0.6 si se encuentra en el cauce principal y 1.0 para las construidas en el cauce de avenidas.
K_H =coeficiente que toma en cuenta la profundidad de la corriente definido por la expresión:

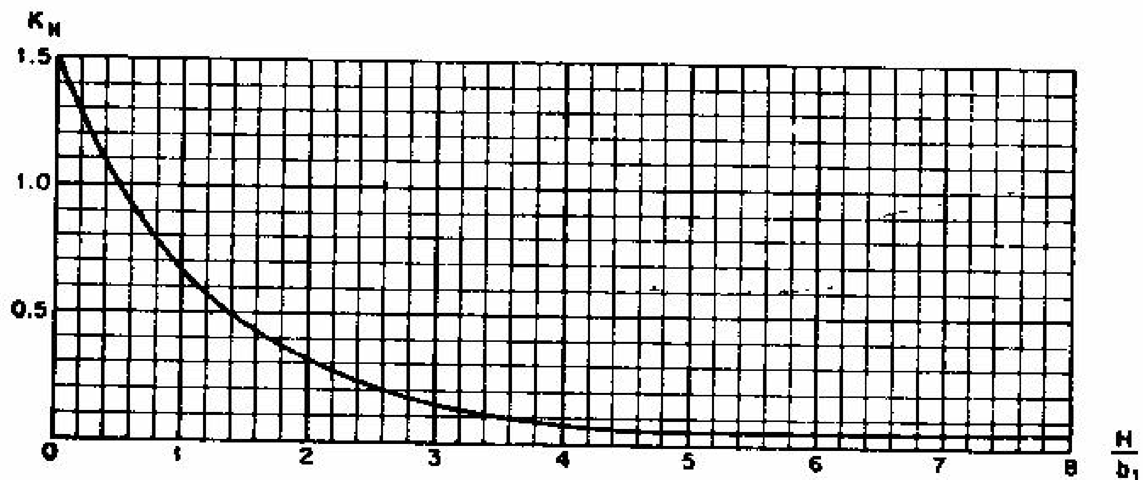
Log $K_H = 0.17 - 0.35\ H/\ b_1$ y que puede encontrarse además con ayuda de la curva de la gráfica 7 fig. 19

H = tirante de la corriente frente a la pila. Este valor es el obtenido al presentarse una avenida después de aplicar lo expuesto en los párrafos alusivos a la estimación de la socavación general.

d = diámetro en m de las partículas más gruesas que forman el fondo y está presentado aproximadamente por el d_{85} de la curva granulométrica. Esto es porque al formarse el embudo producido por la erosión se realiza una selección de los materiales y quedan únicamente los más grandes. En el caso de la distribución del material no sea uniforme en las capas más profundas, al conocer las curvas granulométricas de los estratos a los cuales se supone puede llegar la erosión, se tomará como diámetro representativo al d_{85} mayor de todos ellos. Cuando el material del fondo tiene un diámetro menor de 0.5 cm Yaroslavtziev recomienda no considerar el segundo término de la fórmula. Si un estrato con boleos sobreyace a uno de arena fina, por ejemplo, y la profundidad de socavación llega a está última, al calcular el d_{85} de ella deberá tomarse en cuenta que el boleo no arrastrado se mezcla con la arena, produciendo un nuevo material.



Gráfica 6 para el cálculo de K_v (método de Yaroslavtziev) .(Fig. 18)



Gráfica 7 para el cálculo de K_H (método de Yaroslavtziev) .(figura 19)

El valor del ángulo de incidencia ϕ entre la corriente y las pilas es tomado en cuenta en el valor de b_1, tal como puede observarse en la fig. 20, el cual a su vez, interviene en la valuación de K_H y K_v, Además ϕ afecta directamente al valor del coeficiente K_1 como se observa en esas mismas figuras, excepto en las pilas rectangulares y circulares.

Yaroslavtziev hace hincapié en que, en vista de que el esviajamiento de la corriente influye considerablemente en la erosión, puede resultar que para un caudal de agua menor, pero que incida con el ángulo ϕ máximo, la erosión local llegue a ser mayor que para las condiciones de gasto máximo con el ángulo ϕ menor.

Yaroslavtziev advierte además que su fórmula puede conducir a errores en los casos en que la relación H/ b_1 sea menor de 2 y la pila esté inclinada respecto a la corriente y añade también que los valores con ella obtenidos en esas condiciones son menores que los que realmente se presentan. Previene asimismo, sobre la posibilidad de que ocurran depósitos frente a las pilas o erosiones negativas, en el caso de que las velocidades sean muy bajas.

II.5 Método para suelos cohesivos.

La expresión utilizada es la misma que para suelos granulares y permite dar como resultado aproximado mediante la apreciación de la resistencia a la erosión del suelo cohesivo en comparación con la resistencia a la erosión del suelo granular. Este esta tomado en cuenta en el segundo término (30 d) de la expresión 3.4.15 en donde se considera un diámetro “d”, equivalente para los suelos cohesivos tal y como se muestra en la tabla 9

Cabe aclarar que el tiempo es otro factor importante que debe ser tomado en cuenta, ya que la degradación del fondo en un suelo cohesivo tarda más que un suelo arenoso durante el tiempo que tarda la avenida no se alcance la profundidad obtenida mediante el cálculo. Por este motivo conviene tomar como gasto de diseño el que se presenta durante una avenida con un periodo de retorno más corto.

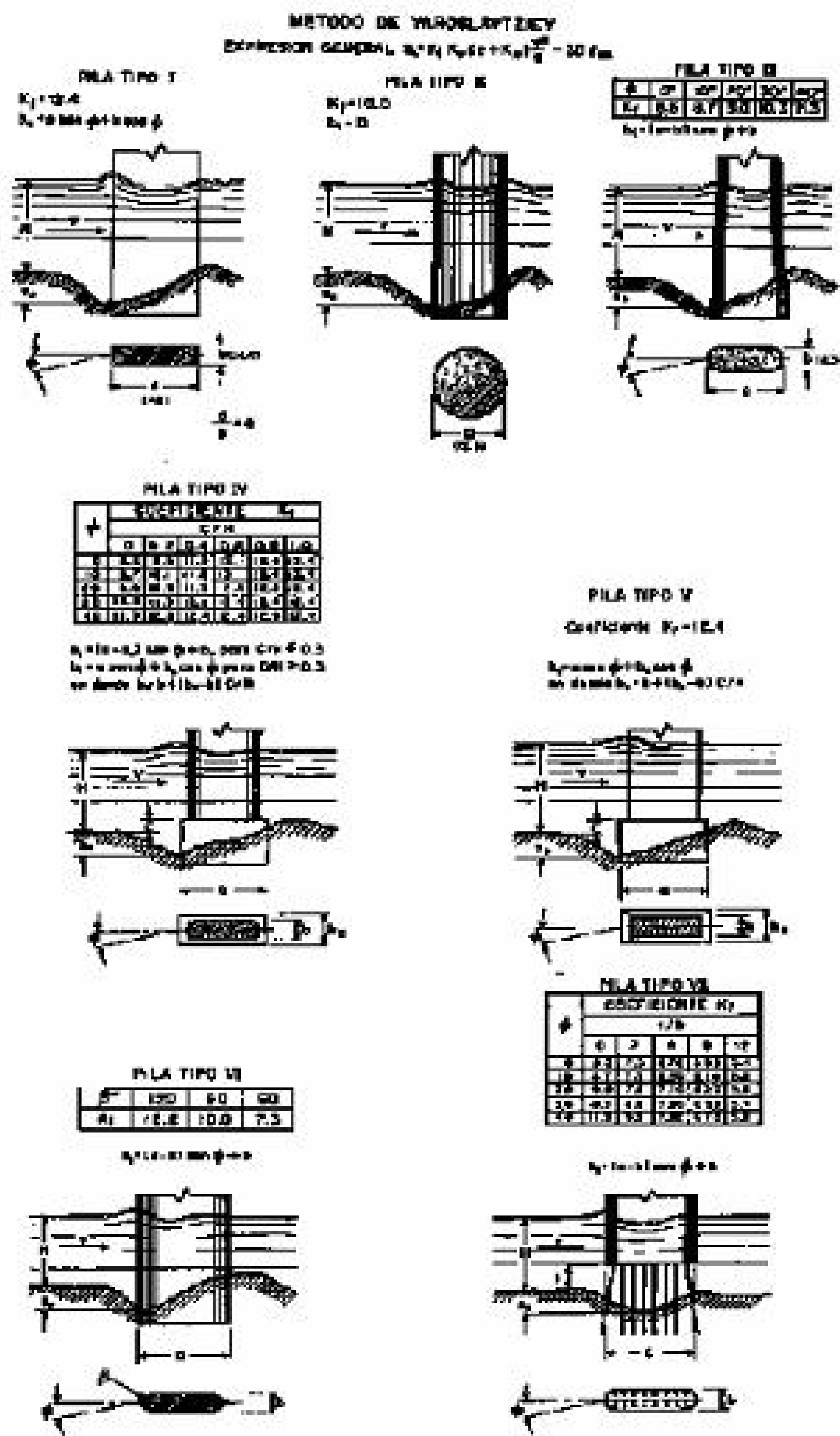
Como puede observarse, para Yaroslavtziev la profundidad depende principalmente de la velocidad media del tirante, de las características de la pila y del material de que está formado el fondo, pero para él no existe un límite en la socavación

Los estudios realizados por Yaroslavtziev presentan dos ventajas notables que son que permiten valuar aproximadamente la profundidad de la socavación cuando el material del fondo es Cohesivo y que incluyen el estudio de pilas no tratadas por otros investigadores como los tipos IV, V y VII presentados en la figura 15 Las geografías estudiadas por él se ven complementadas con las pilas de forma lenticular e hidrodinámica estudiadas por Schneible y Tisón. Su método permite también considerar estratos de boleos en el cauce.

Diámetros equivalentes a suelos granulares, para suelos cohesivos.

Tabla 11

Peso volumétrico del material seco, en ton/m^3.	dimensiones del diámetro equivalente en suelos granulares, cm.		
	Arcillas y suelos altamente plásticos.	Suelos medianamente plásticos.	Suelos de aluvión y arcillas margosas.
< 1.2	1	0.5	0.5
1.2-1.6	4	2	2
1.6-2.0	8	8	3
2.0-2.5	10	10	6



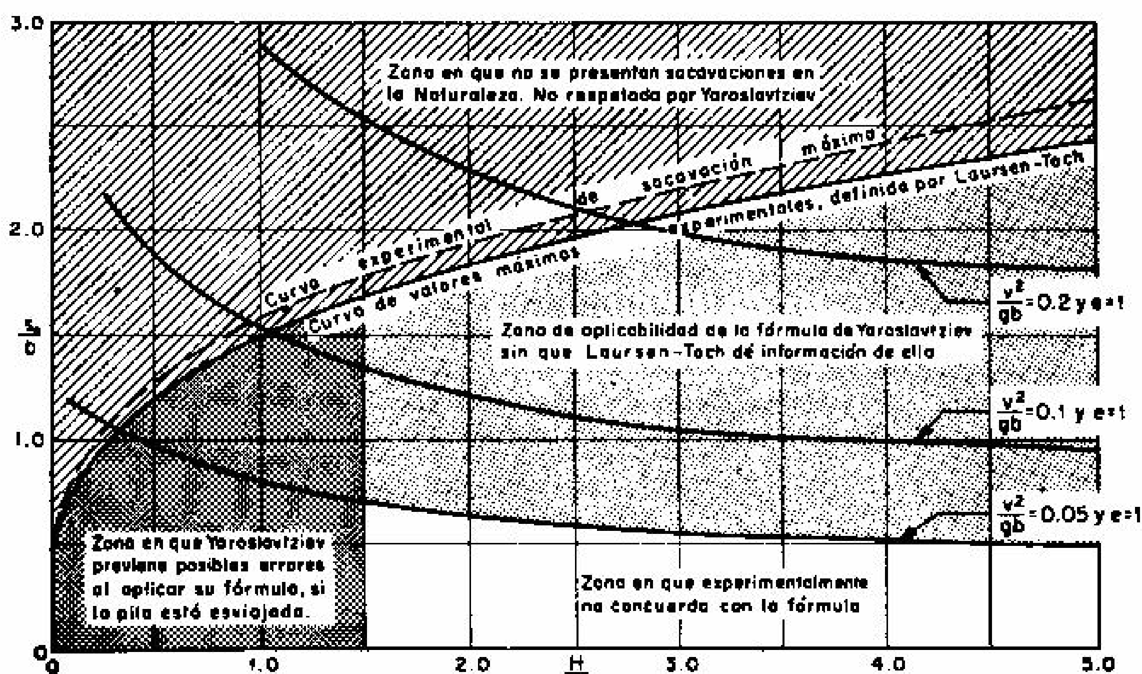
Valores de K_f *y* b_1.　　　　(Fig. 20)

II.6 Comparación entre los métodos de Laursen-Toch y Yaroslavtziev.

En la figura 21 gráfica 8 se muestra gráficamente una comparación entre los campos de aplicabilidad de los métodos propuestos por Laursen, Toch y Yaroslavtziev. La comparación se refiere tanto a lo que indican los autores respectivos, así como los resultados obtenidos en experiencias de la Facultad de Ingeniería de la Universidad nacional De México.

Se dibuja la gráfica correspondiente al criterio de Laursen-Toch, obtenida aplicando la expresión (II.2.13) para diferentes valores de *H/b*: También se muestran tres curvas obtenidas aplicando la expresión (II.4.15) de Yaroslavtziev, para valores de e iguales a 1, lo que corresponde al cauce de avenidas y v^2 / gb igual a 0.05, 0.1 y 0.2, respectivamente. Con línea punteada se muestra la línea de socavación máxima observada en las experiencias realizadas en México.

Como se observa en la figura, pueden delimitarse diversas zonas de interés. Arriba de la curva de Laursen-Toch no se presentan socavaciones reales, según se desprende de la curva experimental presentada para las máximas socavaciones de los mexicanos, debajo de la curva de esta misma grafica estos autores no dan información, pues S_o sólo depende de *H* y de *b,* en tanto que Yaroslavtziev proporciona valores de socavación que pueden caer en toda la zona bajo dicha frontera, dependiendo de las características del caso; los experimentos mexicanos tienden a confirmar estos valores de Yaroslavtziev para todos los casos en que este criterio da valores de S_o menores que el de Laursen-Toch. En cambio, el método del autor ruso no impone límites a la socavación posible, lo cual no fue corroborado por las experiencias, que indicaron una curva correspondiente a la socavación máxima posible en la realidad, si el cálculo con criterio del ruso arroja un punto bajo la curva de los otros dos autores, la experiencia parece confirmar que el valor obtenido es correcto. Nótese que se presenta una zona en blanco, para pequeñas velocidades del agua, en el cual el método de Yaroslavtziev ya no concuerda con la experiencia También se indica la zona en que el mismo ruso previene posibles errores si la pila está esviajada.



Gráfica 8 que muestra las zonas de aplicabilidad de los métodos de Laursen-Toch y Yaroslavtziev. (Figura 21)

II.7 Métodos de la División de Investigación (UNAM)

Los estudios experimentales se llevaron a cabo en tres canales y en una instalación para estudios aerodinámicos. En el primer canal se estudió la forma como se indica y prosigue la socavación, líneas de corriente, etc., y principalmente se realizó la comparación entre los métodos de Yaroslavtziev y Laursen-Toch. En el segundo canal se trato de verificar para otras condiciones, las modificaciones propuestas para la determinación de la socavación obtenida del primer modelo. En el tercero se estudió someramente la socavación en gravas y protecciones formadas con pedraplenes y por último, en las instalaciones para estudios aerodinámicos, se probaron distintos tipos de protección.

En las láminas 1, 2, Y 3 se encuentran condensadas las observaciones realizadas respecto a las trayectorias de las partículas tanto líquidas como sólidas alrededor del obstáculo, forma de iniciarse el proceso erosivo y los avances sucesivos de la socavación.

Es importante aclarar que todos los valores de la socavación registrados con los que se trabajó, corresponden a los máximos observados, los cuales no siempre se presentan en el mismo sitio de la pila está o no desviajada. Así la magnitud de la socavación cuando la velocidad es pequeña y apenas se inicia la erosión, es medida en la esquina de las pilas rectangulares y en las zonas laterales a los 65° respecto al eje en las circulares. Para velocidades mayores y siempre que el ángulo de incidencia se de cero grados, la magnitud máxima de la erosión es medida en el frente de la pila cualquiera que sea su forma.

Si la pila esta esviajada, el valor de la socavación (lamina 3) podrá ser medido en alguna parte del frente cuando la velocidad es menor que la crítica de arrastre. Si la velocidad es tal que ya se tiene un arrastre continuo de partículas, la máxima erosión se mide en el frente de la pila y si la velocidad es mucho mayor, en la esquina no protegida de aguas abajo (esquina c).

En un principio todos los datos obtenidos de cada ensayo para la condición de máxima socavación fueron resumidos en tablas. Con ellos y por medio del análisis adimensional se obtuvieron varios parámetros adimensionales que revelaban al graficarlos alguna dependencia con la socavación. De entre ellos se obtuvo al final una grafica para las pilas rectangulares, redondeadas y circulares que concordaba con la mayoría de los valores observados (graficas 3, .4, y.5).

Los parámetros adimensionales que en ellas intervienen son H+ S_o/b_1 y $F^2=V^2/gH$ en los ejes de las ordenadas y abscisas respectivamente y con H/b_1 como parámetro interior con lo que se tiene una curva para cada valor fijo de H/b_1 que se haya seleccionado.

Las variables anteriores significan:

$H =$ tirante medio aguas arriba de la pila, antes de la erosión

$S_o=$ socavación medida desde el nivel del fondo

$b_1 =$ proyección de la sección de la pila en dirección normal a la corriente

$V =$ velocidad media de la corriente frente a la pila

En general para las pilas esviajadas, el parámetro F^2 se debe corregir y se puede expresar como:

$$F^2 = f_c\,(V^2/gH) \qquad \text{(II.7.16)}$$

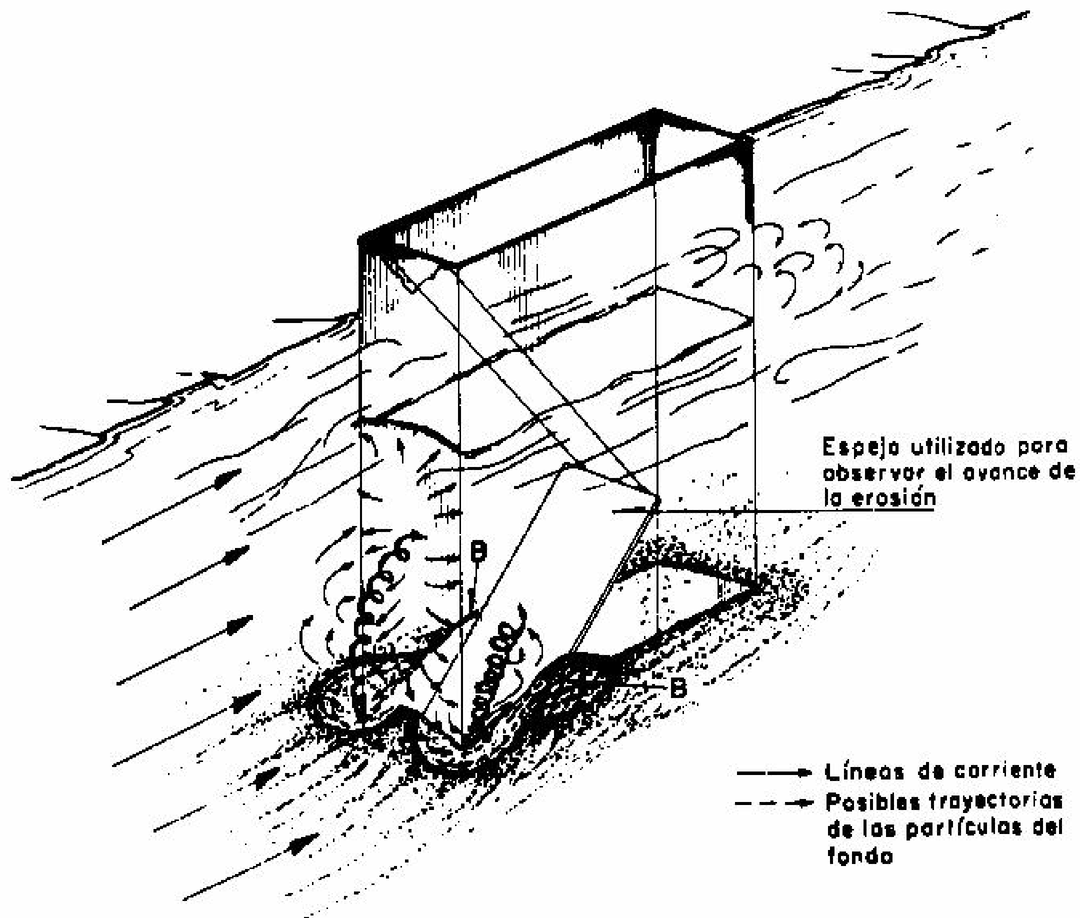
en que f_c es un coeficiente de corrección que depende del ángulo de esviajamiento, según se indica en las graficas 3 y 4.

Un hecho importante que se destaca de las curvas presentadas, las cuales fueron trazadas para materiales cuyos diámetros medios eran 0.17 y 0.56 mm, es que cuando se desea obtener la socavación en un fondo cuyo diámetro medio es 1.30 mm, por ejemplo, la gráfica siempre da valores mayores que los obtenidos; esa diferencia es tanto mayor cuanto menor es el parámetro F^2.

Dos son las limitaciones principales con que puede tropezar quien desee utilizar las gráficas propuestas. La primera es que han sido construidas únicamente para tres diferentes formas de pila, una de las cuales solo tiene interés teórico; esta es la rectangular. Esta forma de pila fue escogida porque es mencionada por la mayoría de los investigadores que han estudiado este

problema y los resultados por ellos obtenidos eran muy fáciles de relacionar con los experimentos. También es útil porque con ella se obtienen las máximas socavaciones, es decir, se tienen las condiciones extremas.

La otra limitación es que no se ha hecho intervenir el diámetro del material. Este problema que no es muy grande dentro del intervalo de las arenas en pilas estudiadas en modelos, y que será aun menor en prototipos, si puede llegar a ser de importancia al tratarse de materiales mucho más gruesos, de todas maneras esto no es una limitación muy seria, debido a que en la mayoría de los casos, los problemas de socavación se representan en pilas que están en cauces formados por arenas y limos.



Estado inicial de socavación. En una pila rectangular se inicia en los esquinas debido a dos vórtices de eje vertical que ahí se presentan

Lámina-1a

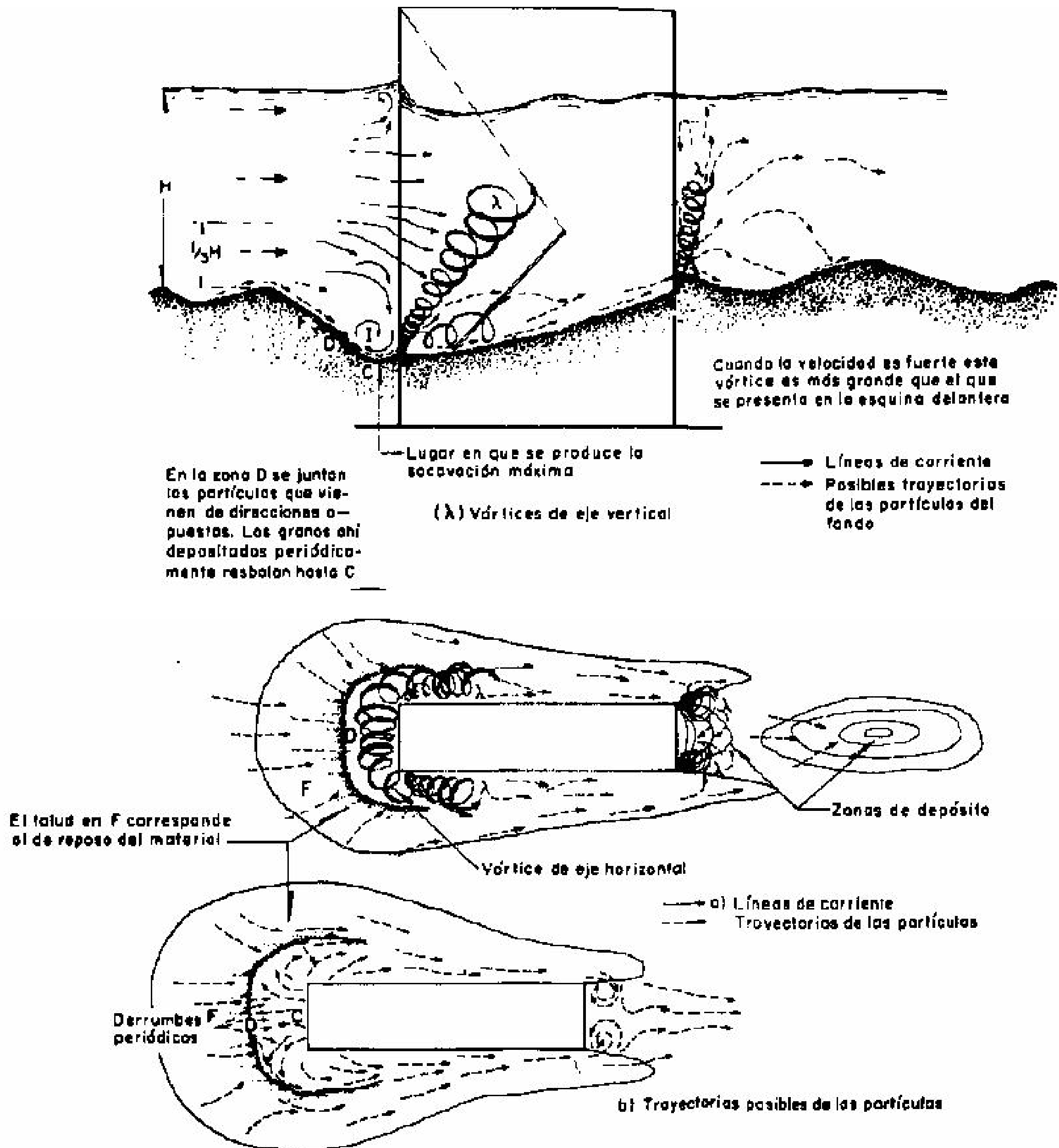
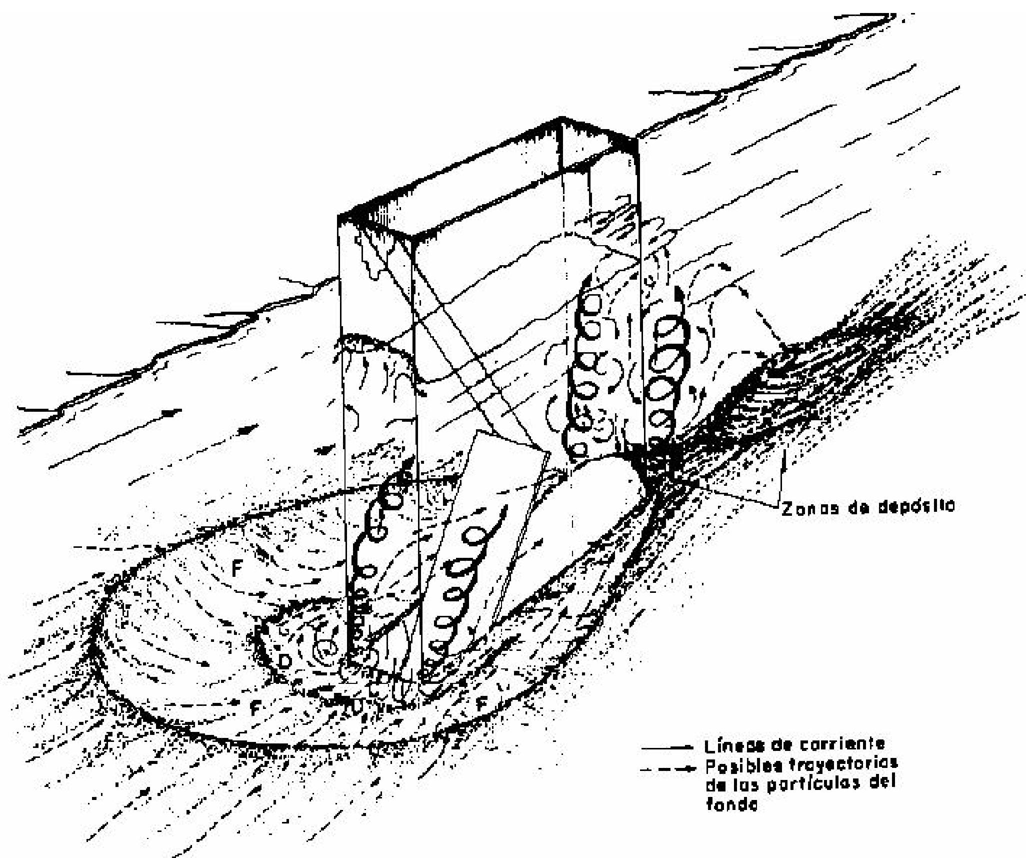

H
1/3H
F
D
C
λ
Cuando la velocidad es fuerte este vórtice es más grande que el que se presenta en la esquina delantera
Lugar en que se produce la socavación máxima
En la zona D se juntan las partículas que vienen de direcciones opuestas. Los granos ahí depositados periódicamente resbalan hasta C
(λ) Vórtices de eje vertical
Líneas de corriente
Posibles trayectorias de las partículas del fondo
Zonas de depósito
El talud en F corresponde al de reposo del material
Vórtice de eje horizontal
a) Líneas de corriente
Trayectorias de las partículas
Derrumbes periódicos
b) Trayectorias posibles de las partículas

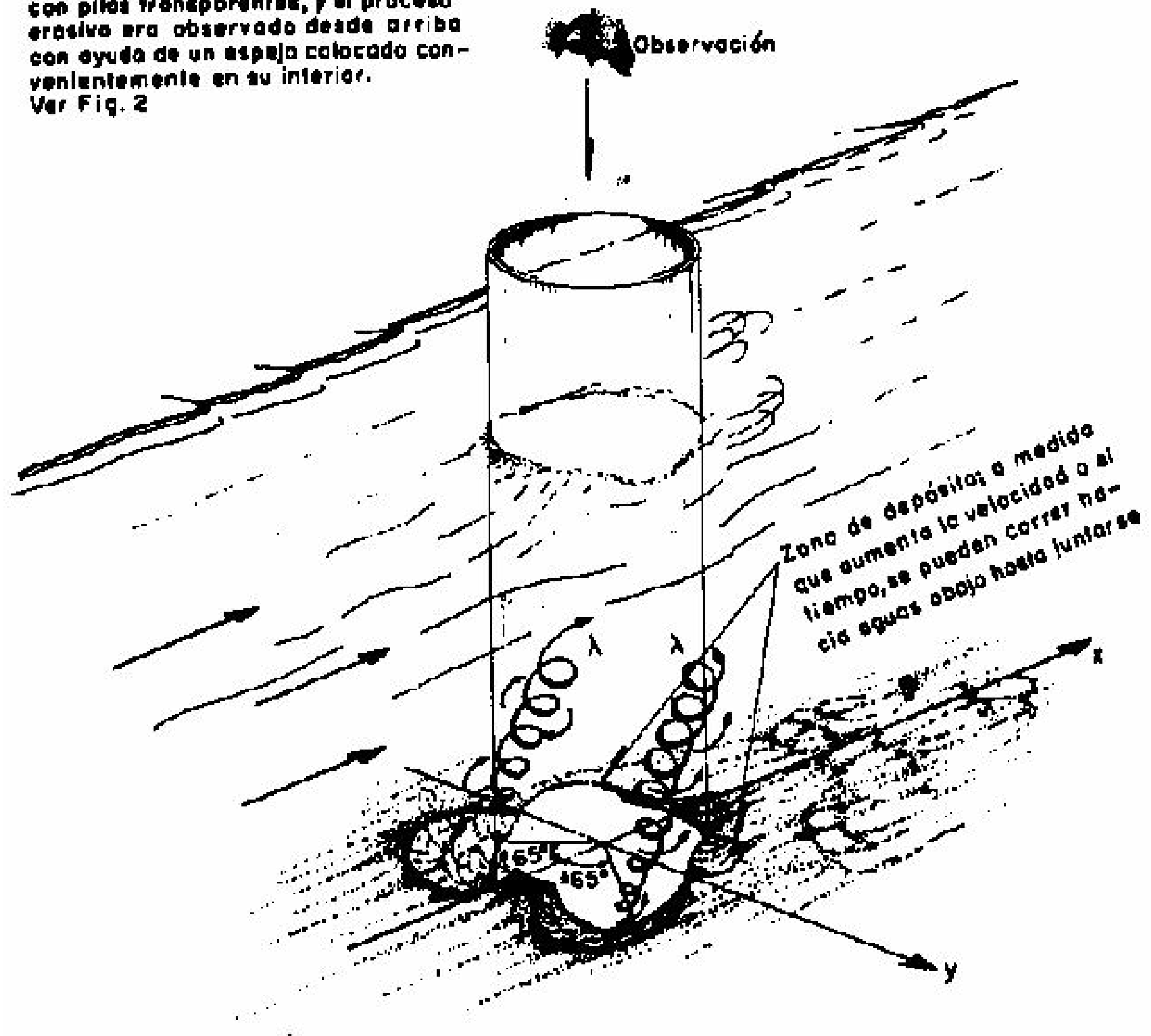
Lámina-1b



Cuando el fondo es plano y todavía no hay arrastre se forman aguas abajo de la pila dos brazos simétricos de ondulaciones, los cuales se han esquematizado en la Figura 3, de la pila circular.

Estado avanzado de socavación

Lámina 1c Socavación en pilas rectangulares.



Estado inicial de socavación

Se inicia en dos puntos colocados aproximadamente a 65° a cada lado respecto a la dirección del flujo (eje x). Los vórtices que ahí se presentan, se conservan hasta obtener la erosión máxima.

Lámina-2a

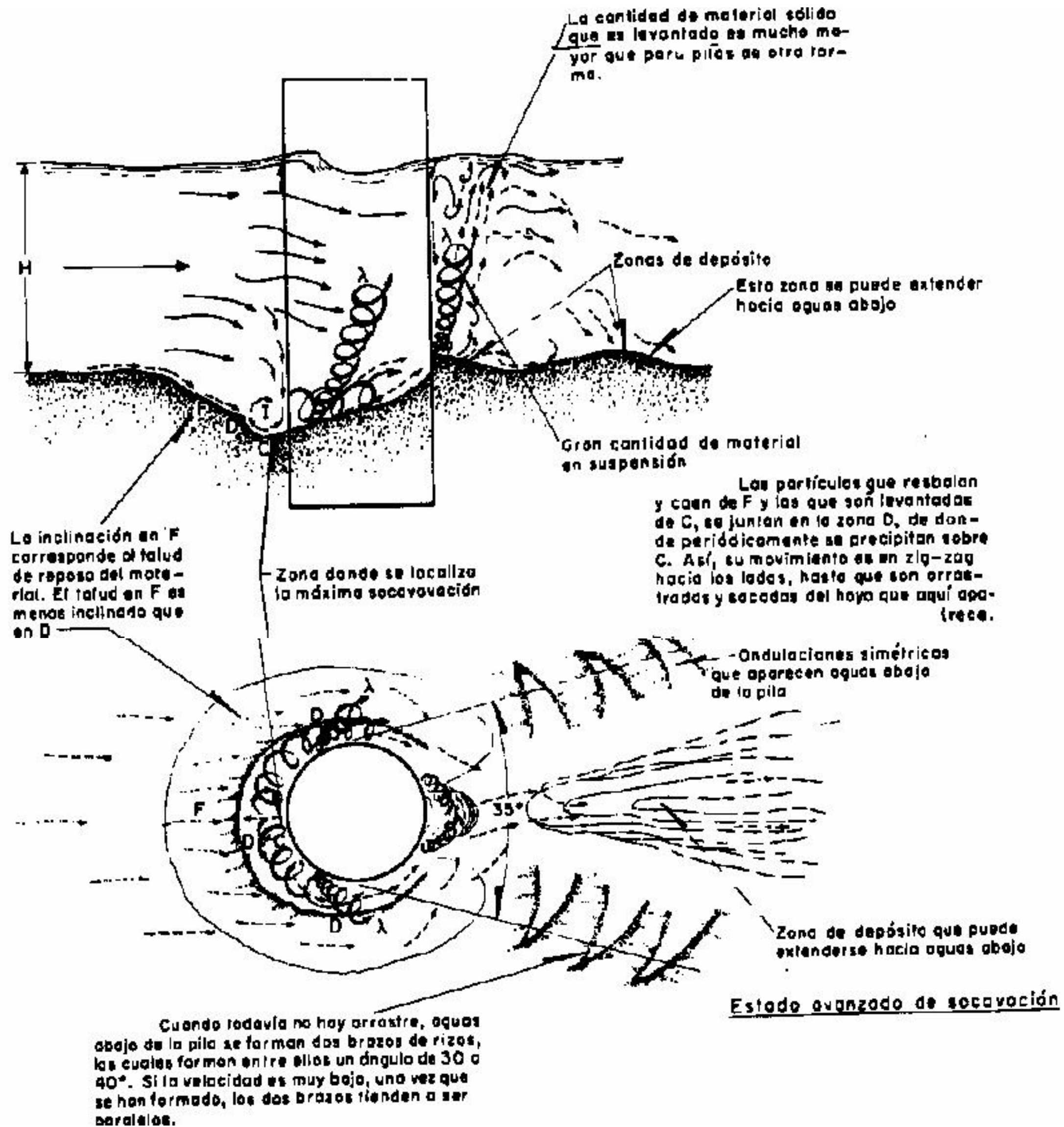

La cantidad de material sólido
que es levantado es mucho ma-
yor que para pilas de otra for-
ma.
H
Zonas de depósito
Esta zona se puede extender
hacia aguas abajo
F
D
C
λ
Gran cantidad de material
en suspensión
Las partículas que resbalan
y caen de F y las que son levantadas
de C, se juntan en la zona D, de don-
de periódicamente se precipitan sobre
C. Así, su movimiento es en zig-zag
hacia los lados, hasta que son arras-
trados y sacadas del hoyo que aquí apa-
rece.
La inclinación en F
corresponde al talud
de reposo del mate-
rial. El talud en F es
menos inclinado que
en D
Zona donde se localiza
la máxima socavación
Ondulaciones simétricas
que aparecen aguas abajo
de la pila
35°
Zona de depósito que puede
extenderse hacia aguas abajo
Estado avanzado de socavación
Cuando todavía no hay arrastre, aguas
abajo de la pila se forman dos brazos de rizos,
los cuales forman entre ellos un ángulo de 30 a
40°. Si la velocidad es muy baja, una vez que
se han formado, los dos brazos tienden a ser
paralelos.

Lámina-2b

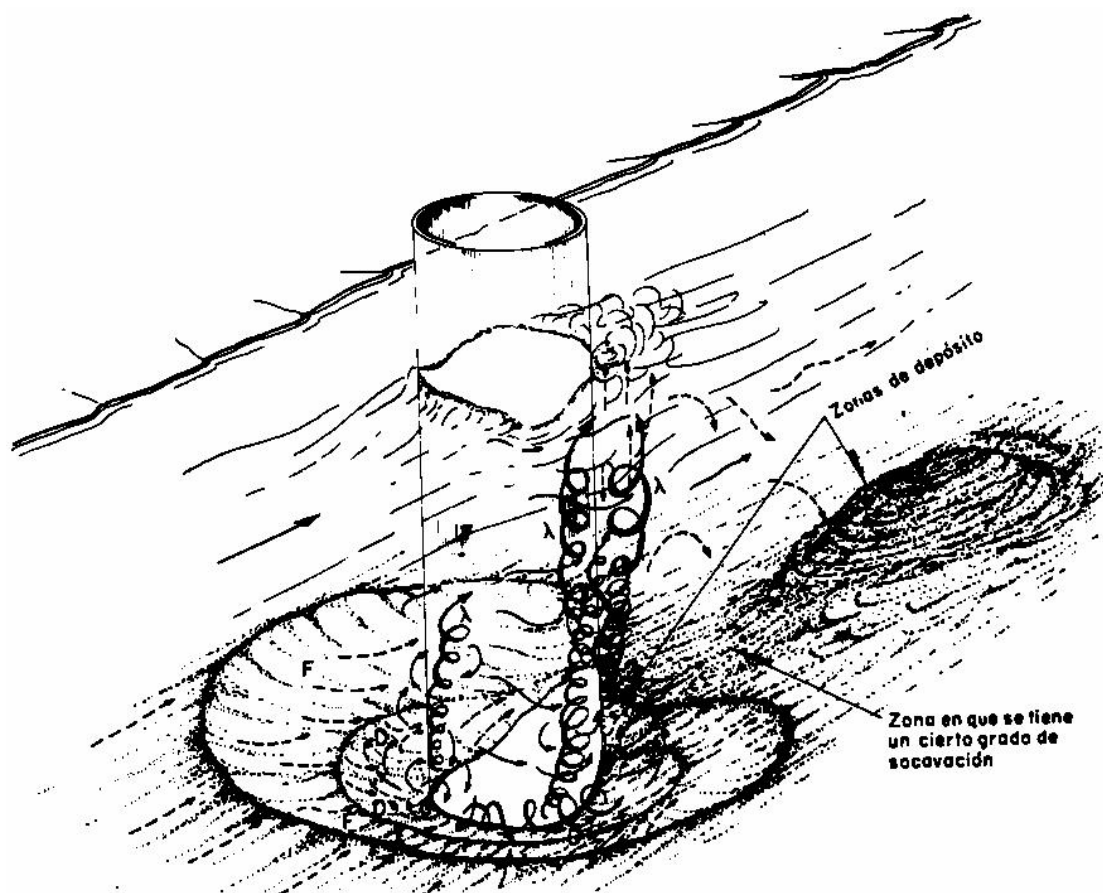


Lámina 2c Socavación en pilas circulares.

FORMA DE INICIARSE LA SOCAVACION

Condición mínima

La socavación se inicia en las esquinas

Zona de depósito

Zona de depósito

CONDICION INTERMEDIA

$V = V_E$

Zona de dep.

CONDICION CERCANA AL MAXIMO

Dirección de la Corriente

Zona de dep.

Arrastre

La profundidad de la erosión puede ser igual en los dos casos

Para iguales condiciones, la erosión se inicia primero en la pila alineada

La profundidad puede ser menor que para la pila alineada

Zona de depósito

Zona de depósito

Zona no erosionada

Arrastre

Zona de depósito

La máxima socavación se presenta en la esquina C y es bastante mayor que en el frente de la pila alineada

Arrastre

La socavación se inicia en dos zonas a ±65° a cada lado del eje

Arrastre

Eje de la pila

Arrastre

Se alcanza la misma profundidad en toda la zona entre los ± 65° medidos a cada lado del eje

Zona de depósito

Eje de la pila

Aquí se presenta una zona, con corrientes ascendentes cargadas de material en suspensión

Zona de depósito

La socavación se inicia en dos zonas a ±65° a cada lado del eje longitudinal

Zona de depósito

Arrastre

Zona de depósito

Arrastre

Zona de depósito

Se cumple lo anotado para la pila rectangular

Zona de depósito

Arrastre

Zona de depósito

Zona de depósito

La máxima socavación se presenta en la esquina C y es bastante mayor que en el frente de la pila alineada

Arrastre

Lámina 3 etapas del proceso erosivo

III. SOCAVACIÓN AL PIE DE ESTRIBOS

Aunque este tipo de erosión ha sido también estudiado por varios autores, entre quienes pueden citarse a Laursen, Shen, Veiga Da Cundha, es la más difícil de determinar y estudiar. El problema se da por la cantidad de parámetros que es necesario tomar en cuenta y porque varían notablemente de un punto a otro, como es el caso del ancho total del estribo con respecto al primer claro del puente, el ángulo de ataque de la corriente, el gasto teórico interceptado por el estribo, sus taludes y la forma e inclinación de las esquinas cuando del estribo es vertical, además de considerar la velocidad y el tirante de la corriente y las propiedades del material del fondo.

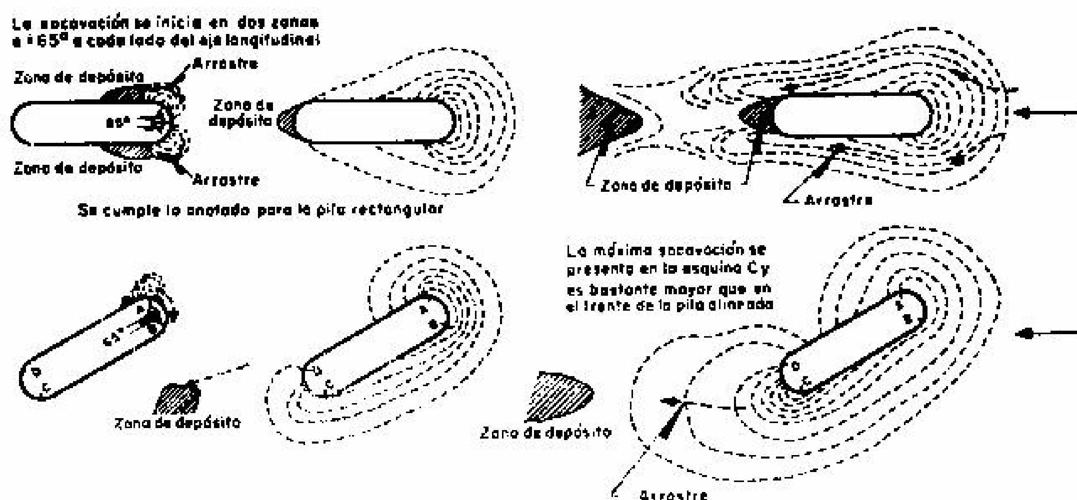
El método que será expuesto se debe a K: F. Artamonov y permite estimar no sólo la profundidad de socavación al pie de estribos, sino además al pie de espigones. Esta erosión depende del gasto que teóricamente es interceptado por el espigón, relacionado con el gasto total que escurre por el río, del talud que tiene los lados del estribo y del ángulo que el eje longitudinal de la obra forma con la corriente. El tirante incrementado al pie de un estribo medido desde la superficie libre de la corriente está dada por:

$$S_T = P_Q P_q P_R H_o \qquad \text{(III.17)}$$

en que.

P_Q = coeficiente que depende del ángulo Q que forma el eje del espigón con la corriente, como se indica en la figura 22; su valor se puede encontrar en la tabla 12.
P_q= coeficiente que depende de la relación Q_1/Q, en que Q_1 es el gasto que teóricamente pasaría por el lugar ocupado por el estribo si éste no existiera y Q, el gasto total que ocurre por el río. El valor de P_q puede encontrarse en la tabla 13.
P_R = coeficiente que depende del talud que tienen los lados del estribo, su valor puede obtenerse en la tabla 14.
H_o = tirante que se tiene en la zona cercana al espigón antes de la erosión.

En la figura 22 se muestra un croquis con una distribución frecuente de estribos.



Disposición de los estribos . (Figura 22)

Tabla-12
Valores del coeficiente correctivo P_Q en función de Q

P_Q	20°	60°	90°	120°	150°
Q	0.84	0.94	1.00	1.07	1.188

Tabla.13

Valores del coeficiente P_q en función de Q_1/Q

Q_1/Q	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
P_q	2.00	2.65	3.22	3.45	3.67	3.87	4.06	4.20

Tabla 14

Valores del coeficiente P_R en función de R

Talud R	0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0
P_R	1.00	0.91	0.85	0.83	0.61	0.50

Como puede observarse en caso de que el cruce del puente se efectúe en forma recta (Q = 90 |) y el talud del estribo sea vertical la expresión de Artamonov queda reducida a:

$$S_T = P_q H_o \qquad \text{(III.18)}$$

Todo lo anterior se aplica en forma semejante en el caso de espigones. Únicamente es necesario añadir que en el caso de tener espigones construidos en ambas orillas y uno frente a otro, S_T se puede reducir a un 75%. Es decir, la expresión (III.17) puede escribirse como:

$$S_T = 0.75 P_Q P_q P_R H_o \qquad \text{(III.19)}$$

No se dispone de ningún criterio que permita valuar la erosión cuando el espigón está cubierto por el agua. Sin embargo como el que se ha expuesto da el valor máximo que se puede llegar a presentar, conviene considerar en un caso de esos, a Q_1 como el gasto máximo que puede ser interceptado teóricamente por el espigón hasta la corona del mismo y sí tomar en la fórmula el tirante H_o hasta la superficie.

Cuando el agua pasa por arriba del espigón es conveniente proteger todo el lado de agua abajo del mismo, porque es una zona que tiende a ser erosionada.

III.1 Protecciones contra la socavación local al pie de pilas

Se puede distinguir dos formas principales para reducir o evitar la socavación. La primera consiste en impedir que el cambio de dirección de las líneas de corriente se produzca frente a las pilas, con lo que se reducen o suprimen los vórtices que se generan en las esquinas. La segunda consiste en hacer que el fondo del cauce alrededor de la pila resiste la acción erosiva.

En este lugar se mencionara una protección de cada tipo.

Una solución del primer tipo es la propuesta por Levy y Luna, método que consiste en provocar, en la zona de que otro modo sería de socavación es una pila, un depósito de material o, por lo menos, una reducción muy substancial de dicha socavación; para ello proponen modificar las condiciones de la corriente cerca de la pila, por medio de otro obstáculo colocado aguas arriba de ella, cuyo efecto en combinación con el de la pila, sea en el sentido expresado. En realidad, la idea de producir una modificación a la corriente por medio de un obstáculo que resulte benéfico para una pila colocada aguas abajo del obstáculo, es antigua, pero en la referencia mencionada, los autores presentan un estudio muy minucioso sobre diversos tipos de obstáculos, distancias y posiciones en que deben colocarse y otros factores, que permiten establecer criterios cuantitativos de detalle, de relativa confiabilidad. El estudio está basado en el comportamiento de numerosos modelos de laboratorio, en los que se reprodujeron las condiciones reales de campo. De él pueden extraerse las siguientes conclusiones, presentadas por los autores.

El obstáculo más apropiado para modificar el régimen de erosión de la corriente en forma favorable para la pila es una pantalla colocada aguas arriba de la pila, alineada con ella. La forma más favorable de la pantalla corresponde a una sección rectangular delgada, de espesor del orden de 1/20 del ancho de la pila, colocada normal a la dirección principal de la corriente. El ancho del obstáculo no debe sobrepasar al de la pila, pues aunque a mayor ancho la eficiencia es mayor, no se considera práctico sobrepasar el ancho de la pila por proteger. La distancia más recomendable de la pantalla a la pila es 2.2 veces el ancho de la última. La pantalla debe de hincarse lo suficiente para que en ningún caso su propia socavación pueda hacerla fallar; si la profundidad de la socavación total de la pila sin protección ha sido calculada, se recomienda hincar la pantalla protectora un 30% más que dicha profundidad. Conviene, por último, que la pantalla no sobresalga del fondo del cauce en más de un 35% del tirante de agua.

En estas condiciones, los autores del trabajo afirman que la socavación adicional que se produciría en la pila sin protección puede reducirse hasta en un 70%. La pantalla puede construirse antes o después que la pila. Finalmente los autores hacen notar que aunque los resultados de su experimento sólo valen en principio para las condiciones que rigieron en el mismo (lecho horizontal, homogeneidad del material de arrastre, tirante de agua constante y relativamente elevado), tienen la impresión de que su valor cualitativo tiene un campo de aplicación mucho más amplio y, de hecho, confían en su método para cualquier caso, especialmente cuando se trate de rellenar socavaciones que ya se han producido.

Una protección del segundo tipo estudiada por Maza y Sánchez Bribiesca consiste en sustituir al material del fondo del cauce por otro más resistente a la erosión. Guijarros, boleo y cantos rodados podrían encontrarse entre los materiales más convenientes.

Uno de los resultados más útiles que se encontró al experimentar con fondos formados con materiales gruesos fue que la velocidad requerida para que la socavación se iniciara era la misma que iniciaba el arrastre de las mismas partículas en cualquier zona del canal. De esta observación

fue posible fijar un criterio para dar el tamaño del enrocamiento protector, ya que se pudieron aprovechar los estudios que se han realizado sobre el inicio del arrastre de partículas.

A continuación se en lista en forma resumida una serie de recomendaciones obtenidas durante las pruebas efectuadas para esta clase de protección, tanto con aire como con agua.

a) De preferencia el boleo debe ser todo de un diámetro uniforme y si eso no es posible, el diámetro mínimo debe ser mayor que el especificado en cada caso (tabla 15).

b) La protección tendrá que estar formada por un mínimo de tres capas, ya que de lo contrario el material del fondo es extraído entre los huecos y el cono erosionado se produce de la misma manera. El espesor de la protección no debe ser menor que el ancho de la pila.

c) Con el Fin de no reducir el área hidráulica útil de la sección transversal bajo el puente se recomienda colocar el boleo bajo el nivel inferior que pueda alcanzarse durante la socavación general.

d) Esta protección sirve cualquiera que sea el ángulo de incidencia de la corriente. Cuando se tiene la certeza que el ángulo de incidencia es de 0° se puede colocar la protección únicamente en el frente de la pila. Cuando la corriente incide con cualquier ángulo y por cualquier lado, hay que rodear a la pila con el pedraplén. A los lados de la pila en su parte central se ha visto que se puede disminuir la profundidad de protección a la mitad del ancho de la pila.

Se realizaron además varias pruebas en las que las piedras eran colocadas directamente sobre el fondo actual, formando un amontonamiento alrededor de la pila y se observó que no se producía una erosión frente al talud de piedras. Únicamente cuando la erosión general ha producido un descenso del fondo adyacente se presentan derrumbes y reacomodos. Sí la erosión general es muy grande, al derrumbarse el cono del pedraplén puede quedar una o dos capas de piedra en la parte cercana a la pila, hecho que permite que el material del fondo sea absorbido por los vórtices del frente de la pila y se inicie la erosión local. Por este motivo sólo podrá ser útil la colocación de este tipo de protección en aquellos casos en que la socavación general sea mínima y siempre colocado una cantidad extra de piedras que ocupen la parte inmediata a la protección directamente sobre el fondo actual es que generalmente este procedimiento resulta más económico; sin embargo no se recomienda.

Tabla 15

Diámetro mínimo, en cm. De los fragmentos del enrocamiento de protección, en función de su peso especifico y de la velocidad de la corriente.

velocidad de la corriente m/s.	Peso especifico del enrocamiento (Kg./m^2)				
	1600	1800	2000	2200	2400
1.0	8	8	7	6	6
1.5	15	13	12	11	10
2.0	18	16	15	13	12
2.5	27	24	21	19	18
3.0	38	34	31	28	26
3.5	53	46	42	38	35
4.0	68	60	54	50	46
4.5	86	77	69	63	58

III.2 Obras de control.

El diseño de las obras apropiadas a cada caso debe hacerse luego de que se conozcan los resultados de los estudios hidráulicos y geomorfológicos del tramo que recibe la influencia de la construcción de dichas obras. Los resultados de los estudios hidráulicos y geomorfológicos presentan pronósticos sobre la evolución futura de la corriente y estimativos sobre magnitudes de los caudales medios, mínimos y de creciente, niveles mínimos, máximos y medios, posibles zonas de inundación, velocidades de flujo, capacidad de transporte de sedimentos, socavación y degradación.

Las obras más comunes en corrientes naturales son las siguientes:

Obras transversales para control torrencial. Operan como pequeñas presas vertedero. Su objetivo principal es el de reducir la velocidad del flujo en un tramo específico, aguas arriba de la obra. Actúan como estructura de control. Pueden fallar por mala cimentación, o por socavación generada inmediatamente aguas abajo.

Espolones para desviación de líneas de flujo. Son estructuras agresivas que, en lo posible, deben evitarse porque pueden producir problemas erosivos sobre las márgenes del tramo aguas abajo. Espolones para favorecer los procesos de sedimentación. Son efectivos cuando se colocan en un sector de alto volumen de transporte de sedimentos en suspensión. Son estructuras permeables, cuyo objetivo es inducir la sedimentación en un tramo adyacente, aguas arriba de las obras. Pueden fallar por erosión en la punta del espolón o en el tramo inmediatamente aguas abajo.

Obras marginales de encauzamiento. Son obras que se construyen para encauzar una corriente natural hacia una estructura de paso, por ejemplo un puente, box-culvert, alcantarilla, etc. Deben tener transiciones de entrada y salida. En el diseño debe considerarse que estas obras de encauzamiento producen un aumento en la velocidad del agua con el consiguiente incremento en la socavación del lecho.

Obras longitudinales de protección de márgenes contra la socavación. Son muros o revestimientos, suficientemente resistentes a las fuerzas desarrolladas por el agua. En algunos casos también deben diseñarse como muros de contención. Pueden fallar por mala cimentación, volteo y deslizamiento.

Acorazamiento del fondo. Consisten en refuerzo del lecho con material de tamaño adecuado, debidamente asegurado, que no pueda ser transportado como carga de fondo. Algunas veces la dinámica del río produce tramos acorazados en forma natural. El fondo acorazado es un control de la geometría del cauce.

Protección contra las inundaciones. Son obras que controlan el nivel máximo esperado dentro de la llanura de inundación. Pueden ser embalses reguladores, canales adicionales, dragados y limpieza de cauces, o jarillones. Estas obras pueden ser efectivas para el área particular que se va a defender, pero cambian el régimen natural del flujo y tienen efectos sobre áreas aledañas, los cuales deben ser analizados antes de construir las obras.

Los materiales de uso frecuente en este tipo de obras son los siguientes:

- Concreto: ciclópeo, simple o reforzado.
- Gaviones, colchonetas.
- Piedra suelta, piedra pegada.
- Tablestacas metálicas o de madera.

- Pilotes metálicos, de concreto o de madera.
- Bolsacretos, sacos de suelo-cemento, sacos de arena.
- Fajinas de guadua.
- Elementos prefabricados de concreto: Bloques, hexápodos, etc.

El diseño de las obras combina varias disciplinas, Hidráulica Fluvial, Geotecnia y Estructuras. La primera, como ya se ha explicado, suministra la información básica que permite determinar las condiciones de cimentación y la magnitud de las fuerzas que van a actuar sobre las obras que se proyecten.



Fotografía 13 Programa de encauzamiento en ríos y protección de estructuras de captación



Fotografía 14 Población inundada.

III.3 Control de inundaciones

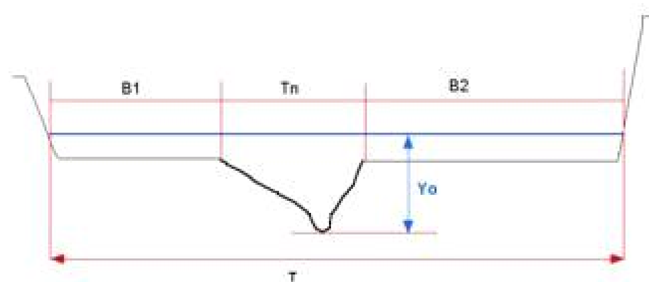
Se conocen como Zonas Inundables las que son anegadas durante eventos extraordinarios, por ejemplo aguaceros intensos, crecientes poco frecuentes o avalanchas. No se incluyen entre las zonas inundables los cauces mayores o rondas de los ríos, los cuales son ocupados con frecuencia del orden de una vez en 10 años.

Las Zonas inundables se clasifican de acuerdo con las causas que generan las inundaciones. Estas causas son las siguientes:

1. Encharcamiento por lluvias intensas sobre áreas planas,
2. Encharcamiento por deficiencias de drenaje superficial.
3. Desbordamiento de corrientes naturales.
4. Desbordamiento de ciénagas.
5. Avalanchas producidas por erupción volcánica, sismos, deslizamientos y formación de presas naturales.
6. Obstáculos al flujo por la construcción de obras civiles: Puentes, espolones y obras de encauzamiento, viviendas en los cauces y represas para explotación de material aluvial.
7. Sedimentación.

Estas causas pueden presentarse en forma individual o colectiva.

Las inundaciones de que trata este artículo son eventos que se presentan en zonas aledañas a los cauces de las corrientes naturales por causa de desbordamiento de las mismas. Las áreas que están sujetas a las inundaciones se denominan Llanuras de Inundación.



En la sección típica simplificada se observan el canal principal y las llanuras de inundación. (figura 23)

Cuando se presenta la inundación por desbordamiento del canal principal, el espejo del agua queda conformado por la boca del canal principal y por las dos franjas inundadas. Este ancho total se denomina Zona Inundada y es igual

a T. donde:

$$T=Tn+B1+B2$$

La boca del canal principal tiene ancho Tn, las franjas inundables o Llanuras de Inundación, B1 y B2, están limitadas por condiciones topográficas o por diques de encauzamiento.

El nivel del agua en la sección depende del caudal, de las condiciones hidráulicas del canal y el ancho de la zona inundarle.

Yo es la profundidad máxima del agua en la sección de flujo.

Las magnitudes y los efectos de las inundaciones dependen de las características de las crecientes que son generadas por lluvias intensas, y de otros eventos relacionados con ellas, como son los deslizamientos de taludes, la formación y el rompimiento de presas naturales, y las obstrucciones al flujo por destrucción de obras civiles.

En lechos aluviales el transporte de sedimentos juega un papel importante en las variaciones que sufre el canal principal a lo largo del tiempo y en su capacidad para transportar las crecientes. Los procesos de depósito y de socavación se activan de acuerdo con las magnitudes de las velocidades del agua; así, durante los estiajes y los períodos de aguas medias predominan los fenómenos de depósito porque las velocidades son relativamente bajas y la capacidad de transporte de sedimentos es reducida. Cuando llegan las crecientes se aumentan las velocidades de flujo y por tanto se incrementan los procesos erosivos y los ataques contra las márgenes.

Los problemas de inundaciones son particulares y pueden ocurrir tanto en cauces de montaña como en cauces de llanura, aun cuando son más frecuentes en estos últimos.

Algunos de los problemas que se presentan con las inundaciones son los siguientes:

- Anegamiento de las llanuras de inundación y daños en viviendas, vías de comunicación, y producción agropecuaria, con pérdida de vidas humanas en algunos casos.
- Drenaje lento de las áreas inundadas las cuales se convierten en depósito de aguas prácticamente estancadas. Esta situación genera problemas sanitarios sobre la población.
- Ataques del flujo sobre las márgenes del cauce principal lo cual produce cambios de curso permanentes y pérdida de áreas productivas

III.4 Mitigación de los efectos de las inundaciones.

Son muy pocos los casos en los cuales es posible solucionar los problemas de inundaciones de forma permanente. Algunas de las razones más importantes que no permiten la solución son el costo de las obras, los conflictos socioeconómicos de las regiones que conllevan intereses en el uso de la tierra, y la escasa factibilidad económica de este tipo de proyectos. Por esta razón se utilizan los términos Control de Inundaciones o Mitigación de los efectos de las Inundaciones para indicar que estos proyectos tratan de prevenir daños mayores y ofrecen protección hasta un cierto nivel de riesgo.

El costo de las obras está en función de la frecuencia del evento de inundación. En la protección de campos agrícolas, por ejemplo, la frecuencia de diseño contra inundaciones puede estar entre 5 a 25 años porque eventos mayores pueden requerir de obras que valen más que los cultivos que se van a proteger. En otros casos, en los cuales las inundaciones pueden ocasionar pérdidas de vidas humanas puede ser preferible instalar sistemas de alerta o reubicar la población que se encuentra en peligro, antes que proyectar obras para frecuencias de 10.000 años o más.

Dependiendo de las características particulares de los casos que requieren de estudios de control de inundaciones, el procedimiento general que se sigue es el siguiente:

1. Delimitar las zonas inundables. Puede hacerse utilizando cartografía, fotografías aéreas, topografía de campo, encuestas e inventario de eventos históricos.
2. Determinar las causas de las inundaciones. Pueden ser desbordamientos, encharcamientos, deficiencias de drenaje, avalanchas, obstrucciones o sedimentación.
3. Realizar estudios Geológico, Geotécnico, Socioeconómico, Ambiental e Hidrológico para delimitar cuencas vertientes, analizar el uso de la tierra y las corrientes naturales que afectan la zona que se va a proteger, cuantificar clima, lluvias y caudales líquidos y sólidos. Definir magnitudes de los eventos extremos que pueden generar inundaciones.

4. Realizar estudios económicos para cuantificar los perjuicios que han causado inundaciones anteriores y para estimar los perjuicios futuros, con niveles de riesgo determinados, sobre las actividades agropecuarias, industriales y habitacionales de la zona.
5. Realizar estudios Geomorfológicos y de Hidráulica Fluvial para conocer la dinámica fluvial y estimar capacidades de los cauces, estabilidad, trayectorias y tendencias futuras, delimitación de zonas inundables para eventos extraordinarios e incidencia de obras civiles existentes y proyectadas.
6. Diseñar las obras de mitigación de los efectos de las inundaciones y estimar sus costos.

De una manera general los proyectos de control de inundaciones estudian las siguientes opciones:

- Dejar las cosas como están y convivir con el problema.
- Establecer sistemas de alerta para que la población pueda ponerse a salvo.
- Proyectar la construcción de obras civiles:

- Terraplenes protegidos por obras marginales.
- Muros en concreto o en gaviones.
- Diques longitudinales, denominados también Jarillones.
- Embalses de regulación.
- Canales de desviación o By-pass.

IV. COMO EVITAR INUNDACIONES

Medidas estructurales. Están constituidas por obras de infraestructura hidráulica destinadas al control de inundaciones y pueden clasificarse en:

a) Obra de Regulación:

Son fundamentalmente las presas, que permiten almacenar temporalmente una parte de las crecientes para después descargarlas en forma controlada.

En los últimos años se ha dado más importancia a las obras de mejoramiento de cuencas (reforestación, terraceo, azolves, etcétera), mediante las cuales se disminuye y regula es escurrimiento superficial, contrarrestando, al menos parcialmente, los efectos negativos de la urbanización.

b) Obras de rectificación

Su función es facilitar el transporte rápido del agua por su cauce, dragando los ríos para conservar su altura original y disminuir, de esta manera, las posibilidades de que ocurra un desbordamiento. Están constituidas fundamentalmente por la rectificación de cauces y el incremento de su pendiente mediante el corte de meandros.

c) Obras de protección

Bordos longitudinales. Se establecen a lo largo de una o ambas márgenes del río y su función es mantener el agua dentro del cauce del mismo.

Bordos perimetrales: Su función es evitar que las inundaciones alcancen poblaciones o

zonas de gran importancia económica.

Medidas no estructurales o institucionales. Estas son medidas de Protección Civil que buscan disminuir los daños causados por las inundaciones y pueden ser de carácter permanente o aplicable sólo con la relación a la presencia de un fenómeno hidrometeorológico importante.

Medidas permanentes. Son constituidas por la reglamentación del uso del suelo, apoyada en una zonificación de las llanuras inundables. Su propósito es evitar que bienes de gran valor económico y social se ubiquen en zonas sujetas al riesgo de inundación.

Medidas de operación. Todas las medidas que se tomen cuando se presenta un fenómeno hidrometeorológico que puede causar una inundación, deben apoyarse en modelos pronósticos en sus diferentes fases (pronóstico de la ocurrencia de la lluvia, de su transformación en escurrimiento superficial, de su tránsito por los cauces, las obras de infraestructura, etcétera).

IV.1 Fotografías en temporada de lluvias y estiaje Río Santiago-Lerma (PH El Cajón).Tepic.



Fotografía 13 Avenida del 25 y 26 de septiembre 2004, fotografía cubriendo los túneles de desvió (P.H. El Cajón)



Fotografía 14 régimen turbulento.



Fotografía 15 arrastre de materiales y sedimentos ubicación puente Mabey.



Fotografía 16 túnel de desvió en temporada de estiaje (P.H. El Cajón).



Fotografía 17 temporadas de estiaje ubicación puente Mabey.



Fotografía 18 temporada de estiaje, formación de playones.



Fotografía 19 régimen tranquilo formación de playones e islitas consecuencia de aportación de materiales finos.



Fotografía 20 temporada de estiaje.



Fotografía 21 temporada de estiaje.

V. FOTOGRAFÍAS DE SOCAVACIÓN EN PUENTES, RÍOS Y CARRETERAS CHIAPAS.



Fotografía 22 canal y tramo carretero socavado.



Fotografía 23 antes



Fotografía 24 durante



Fotografía 25 después

Construcción del puente rosario, Arriaga-Pijijiapan.



Fotografía 26 antes.



Fotografía 27 durante.



Fotografía 28 después. Construcción de muro de contención de gaviones, Tapanatepec-Talismán.



Fotografía 29 antes Socavación en pilas del puente



Fotografía 30 construcción del puente actual y demolición del anterior



Fotografía 31 puente actual



Fotografía 32 socavación de la carretera



Fotografía 33 socavación de la carretera

V.1 Fotografías aéreas de la devastación de Chiapas.



Fotografía 34



Fotografía 35



Fotografía 36

VI. CONCLUSIONES.

El cambio climático del planeta: Consistentes en a acumulación de gases de efecto de invernadero tales como el anhídrido carbónico, el metano, el oxido nitroso y los clorofluorocarburos (CFC) que retienen el calor solar. Probablemente – decía el documento- estén causando un aumento gradual de la temperatura media del planeta. Entre las consecuencias posibles se cuentan el aumento del nivel del mar que amenazara las zonas del litoral; la desertificación; malas cosechas, condiciones climáticas extremas; alteraciones en los fenómenos de las estaciones tales como los monzones, y regímenes de lluvias imprevisibles con extremos de inundaciones.

El Agotamiento de la Capa de Ozono: Los clorofluorocarbonos, otros compuestos de cloro y los halones, forman con el oxigeno reacciones químicas que destruyen el ozono de la estratosfera, que protegen el planeta contra los daños causados por la radiación ultravioleta del sol. La mayoría de los sustitutos de los CFC que se han elaborado hasta ahora también dañan la capa de ozono. Se estima que el empobrecimiento de la capa de ozono este causando daños a los cultivos, al plancton oceánico y a los ecosistemas mas sensibles, con una mayor incidencia de canceres cutáneos, cataratas y enfermedades del sistema inmunitario humano tales como el SIDA.

Lluvia Ácida: Debido a la contaminación del aire se produce lluvia, nieve, escarcha, niebla y polvo con un grado anormal de acidez. Estas es la forma más común de contaminación aérea trans-fronteriza y causa muerte de peces, plantas y árboles en lagos, ríos y bosques. Bruma Industrial o niebla urbana: El ozono troposferico (que se encuentra al nivel del suelo) el monóxido de carbono y otros contaminantes continúan empeorando la cálida del aire en las hacinadas zonas metropolitanas del mundo, y son causa o contribuyen de una serie de dolencias respiratorias y de la salud en general, con resultados a menudo fatales.

Las causas del cambio climático, el agotamiento de la capa de ozonos, la lluvia ácida y la niebla urbana son las actividades humanas vinculadas a:

- Quema de combustibles fósiles (petróleo, gas y el carbón en las usinas termoeléctricas)
- Fabricas

- Automóviles
- Aviones
- Calderas de calefacción
- Quema de bosques
- Tecnologías industriales y de fabricación sucia (petroquímicos.
- Los clorofluorocarbonos se utilizan en aplicaciones industriales, comerciales y militares, incluso la refrigeración
- El aire acondicionado
- La propulsión de aviones y cohetes
- Los rociadores aerosoles
- Aparatos eléctricos y espuma plástica

En la última década, varios modelos complejos de circulación general (GCMs), han intentado simular los cambios climáticos antropogénicos futuros. Han llegado a las siguientes conclusiones: Un calentamiento global promedio, de entre 1,5 y 4,5 °C ocurrirá, siendo la mejor estimación 2,5 °C .

La estratosfera se enfriará significativamente.

El entibiamiento superficial será mayor en las altas latitudes en invierno, pero menores durante el verano.

La precipitación global aumentará entre 3 y 15%.

Habrá un aumento en todo el año de las precipitaciones en las altas latitudes, mientras que algunas áreas tropicales, experimentarán pequeñas disminuciones.

Modelos más recientes dependientes del tiempo, que acoplan los componentes oceánicos y atmosféricos, han entregado estimaciones más confiables, los resultados más significativos indican:

Un calentamiento global promedio de 0,3 °C por década, asumiendo políticas no intervencionistas. Una variabilidad natural de aproximadamente 0,3 °C en temperaturas aéreas superficiales globales, en una escala de décadas.

Cambios en los patrones regionales de temperatura y precipitaciones similares a los experimentos de equilibrio. La temperatura global promedio podría aumentar entre 2 y 4 °C para el año 2100, si el desarrollo global continúa a los ritmos actuales. Si las naciones no actúan, el mundo podrá experimentar numerosos impactos adversos como resultado del calentamiento global futuro” Hace mucho los investigadores predijeron que los impactos más visibles de un mundo globalmente más cálido ocurrían primero en latitudes altas: temperaturas del aire y el mar ascendente, el derretimiento prematuro de la nieve y el congelamiento tardío del hielo, reducciones en el hielo marino, deshielo del permafrost, más erosión y aumentos en la intensidad de las tormentas. Todos estos impactos se han documentado en Alaska.

Los fenómenos climatológicas de los años recientes han ocasionado la destrucción por socavación de numerosas obras de cruce y protección así como puentes y obras de mayor tamaño, en consecuencia, se registraron grandes y lamentables pérdidas humanas como económicas, y se requieren estudios en forma intensiva y en cooperación con las instituciones involucradas en este problema, es recomendable el establecimiento de líneas de investigación amplias, basadas principalmente en el análisis de información recopilada en el campo y en el

impulso de un grupo especialista dedicado a esta actividad. Los objetivos principales propuestos serian los siguientes:

Definir la información necesaria para avanzar en el conocimiento del proceso de socavación.

- Promover la recopilación de información sobre socavación, particularmente en mediciones a escala real.
- Ordenar datos para su análisis.
- Impulsar y asesorar la investigación basada en la información obtenida.
- Calibrar procedimientos y criterios para el diseño hidráulico de las obras fluviales y canales.

Así como tener en cuenta los principales factores que actúan en la generación de los caudales sólidos y líquidos que llegan a los cauces naturales y son transportados por ellos están relacionados con las características de las lluvias y de la cuenca, la erosión pluvial y la dinámica de los cauces.

Para evitar catástrofes a futuro y cuidar la economía, el medio ambiente, la fauna y sobretodo las vidas humanas.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Mecánica de suelos
   Tomo II teoría y aplicación de la mecánica de suelos.
   Tomo III Flujo de agua en suelos.
   Juárez Badillo-Rico Rodríguez
   Editorial Limusa.
2. CNA-IMTA.
   Control y protección de cauces.
   Gilberto Salgado Maldonado.
   CNA-IMTA
3. Apuntes de la ESIA Zacatenco.
   Estudios y protección de obras fluviales
   Enrique Albarran Aguilar
   Académico del área de hidráulica.
4. Archivo fotográfico.
   (P.H. El Cajón).
   CIISA-CFE.
5. Albertson, Maurice; Kia, Rahim. Editores. Design of Hydraulic Structures 89. Proceedings of the second International Symposium on Design Of Hydraulic Structures. Fort Collins. Colorado. Ed. A.A.Balkema. 1989.

6.-Brunn, Per. Port Engineering. Gulf Publishing Company. 1973.

7. Colegio de Caminos, Canales y Puertos. Reparación de Obras Hidráulicas de Hormigón. Universitat Politécnica de Catalunya. España. 1991.

8. Creager, Justin, Hinds. Engineering for Dams. John Wiley & Sons. 3 volúmenes. 1944.

9. Department of the Army Corps of Engineers. Hydraulic Design of Reservoir Outlet Works. Engineer Manual. 1980.

10. Leliavsky, Serge. Design Textbooks in Civil Engineering: Irrigation, Dams, Rivers, Canals, Weirs, Bridges, Hydroelectric Engineering. 8 volúmenes. Chapman & Hall. 1965.

11. Marsal, Raúl; Resendiz, Daniel. Presas de Tierra y Enrocamiento. Editorial Limusa. México. 1979.
12. Michael, A; Khepar, S. Water Well and Pumping Engineering. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited. 1989.
13. Munro, C; Bell, F; Watson, B. The Efficient Operation of Dam Spillway Gates. The University of New South Wales. Water Research Laboratory. Australia. 1967.
14. Novak, P; Moffat, A; Nalluri, C; Narayanan, R. Hydraulic Structures. Unwin Hyman. Chapman & Hall. 1989.
15. Quinn, Alonzo. Design and Construction of Ports and Marine Structures. McGraw-Hill. 1972.
16. Roberson, Cassidy, Chaudhry. Hydraulic Engineering. Houghton Mifflin Company. 1988.
17. Schoklitsch, A. Arquitectura Hidráulica. 2 volúmenes. Editorial Gustavo Gili.
18. Suárez Villar, Luis. Ingeniería de Presas, Obras de Toma, Descarga y Desviación. Ediciones Vega. Caracas. 1989.
19. Suárez Villar, Luis. Presas de corrección de torrentes y Retención de Sedimentos. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. República de Venezuela. 1993.
20. Torres, Francisco. Obras Hidráulicas. Editorial Limusa. México. 1981.
21. United States Bureau of Reclamation. Diseño de presas pequeñas. Compañía Editorial Continental, S.A. México. 1979.
22. United States Bureau of Reclamation. Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators. Engineering Monograph No. 25. 1978.
23. Vargas, Vicente. Técnicas y análisis de costos de pozos profundos y aguas subterráneas. Editorial Limusa, S. A. 1976.
24. Varshney, R. Concrete Dams. Oxford & IBH Publishing Co. New Delhi. 1988.
25. Vischer, D; Hager, W. Dam Hydraulics. Wiley Series in Water Resources Engineering. 1998.
26. Zipparro, Vincent; Hasen, Has. Davis´Handbook of Applied Hydraulics. 4th Edition. McGraw-Hill. 1993.
27. Zopetti, G. Centrales Hidroeléctricas. Editorial Gustavo Gili S. A. 1979.
28. Revista muy especial desastres No.02/06. Editorial Televisa Internacional.

El origen de Los **Vientos**

www.clubdelamar.org/los**vientos**.htm

Vientos y precipitaciones

www.astromia.com/tierraluna/vientolluvia.htm

Navegación: Mar: Viento

www.mgar.net/mar/viento.htm

Navegación: Mar: **Vientos** Alisios

www.puertos.es/home.html

www.mgar.net/mar/alisios.htm

http://www.astromia.com/tierraluna/vientolluvia.htm

http://www.astromia.com/tierraluna/vientolluvia.htm